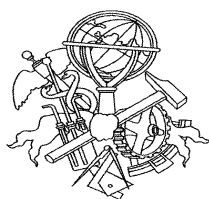


# Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais

Carlos Jorge Constante

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



21 de julho de 2014



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia  
Mecânica

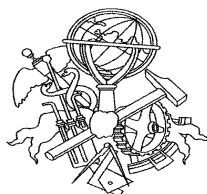
Candidato: Carlos Jorge Constante, 1100981, 1100981@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Co-Orientador: Arnaldo Manuel Guedes Pinto, agp@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



21 de julho de 2014



*À Mariana e ao Miguel*



## *Agradecimentos*

Ao professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. A sua ajuda foi imprescindível para a conclusão do mesmo.

Ao professor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, Co-Orientador da presente dissertação, pela sua disponibilidade e dedicação na realização da parte experimental, bem como na ajuda necessária para a validação dos métodos experimentais.

Ao professor D. C. Moura, pela sua disponibilidade e dedicação no tratamento informático das fotos para obtenção dos parâmetros do método óptico.

Finalmente, à minha família pelo apoio e compreensão.





## Resumo

A utilização das juntas adesivas tem aumentado nas últimas décadas devido às suas características competitivas comparativamente aos métodos tradicionais de união, como a soldadura, a rebiteagem ou a ligação aparafusada. De facto, as juntas adesivas são mais leves, comportam-se bem sob cargas cíclicas ou de fadiga, permitem a ligação de materiais diferentes e apresentam menores concentrações de tensões. Para aumentar a confiança no projecto de estruturas coladas, é importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica. A abordagem pela Mecânica da Fractura é frequentemente aplicada por uma análise energética, onde o parâmetro principal a determinar para previsão da evolução do dano e rotura é a taxa crítica de libertação de energia ( $G_c$ ). Este parâmetro pode ainda ser dividido em componente de tracção ( $G_{Ic}$ ) e corte ( $G_{IIc}$ ). Diversos autores abordaram recentemente o tema da determinação do valor de  $G_{Ic}$  de camadas finas de adesivos em juntas coladas. A maioria dos trabalhos publicados sobre caracterização à fractura em tracção utiliza o ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB). As principais vantagens do ensaio DCB incluem a sua simplicidade e a possibilidade de obter  $G_{Ic}$  matematicamente usando a Teoria das Vigas.

Este trabalho pretende determinar o valor de  $G_{Ic}$  de juntas adesivas pelo ensaio DCB, considerando adesivos com diferentes graus de ductilidade. Recorre-se maioritariamente ao método do integral- $J$ , para que a estimativa do valor de  $G_{Ic}$  tenha em consideração a plasticidade dos adesivos estudados. Para o cálculo do valor do integral- $J$ , é utilizado um método óptico de medição desenvolvido precisamente para a avaliação da abertura da extremidade da fenda e da rotação dos substratos na extremidade da fenda. O processo será suportado por uma subrotina em Matlab® para a extracção automática destes valores. A lei coesiva do adesivo em tracção é obtida pelo método directo. O método do integral- $J$  é também comparado com métodos mais tradicionais para avaliação de  $G_{Ic}$  (métodos tradicionais que requerem a medição do comprimento da fenda e métodos baseados no comprimento de fenda equivalente).

A correlação entre todos os métodos de obtenção de  $G_{Ic}$  para os três adesivos (Sikaforce® 7888, Araldite® 2015 e Araldite® AV138) foi consistente, apesar de existirem ligeiras diferenças entre os valores obtidos.

***Palavras-Chave***

Double-Cantilever Beam, ligação adesiva, adesivo estrutural, mecânica da fractura, tenacidade.

## *Abstract*

The use of adhesive joints has increased in recent decades due to competitive characteristics compared to traditional methods, such as welding, riveting or screw connections. In fact, adhesive joints are lighter, they behave well under cyclic loads or fatigue, allow connection of different materials and have lower stress concentrations. To increase confidence in the design of bonded structures it is necessary to accurately predict their mechanical strength. The fracture mechanics approach is often applied by an energy analysis, where the main parameter to be determined for prediction of damage evolution and failure is the strain critical energy release rate ( $G_c$ ). This parameter can be further divided into the tensile ( $G_{Ic}$ ) and shear ( $G_{IIc}$ ) components. Several authors have recently addressed the subject of determining the value of  $G_{Ic}$  of thin layers of adhesives in bonded joints. Most of the published works on the characterization of fracture tensile test uses the Double Cantilever Beam (DCB). The main advantages of the DCB test include its simplicity and the possibility of obtaining  $G_{Ic}$  mathematically using the Beam Theory.

This work aims to determine the value of  $G_{Ic}$  adhesive joints using the DCB test, considering adhesives with different degrees of ductility. The  $J$ -integral is mainly used, so that the estimate of  $G_{Ic}$  takes into account the plasticity of the studied adhesives. To calculate the  $J$ -integral value, a method of optical measurement was developed specifically for the assessment of the crack tip opening and adherents rotation at the crack tip. The process was supported by a subroutine in Matlab<sup>®</sup> for the automatic extraction of these values. On the other hand, the cohesive law of the adhesive in tension was obtained by the direct method. The  $J$ -integral method was also compared with more traditional methods for evaluating  $G_{Ic}$  (traditional methods which require the measurement of the crack length and methods based on the equivalent crack length).

The correlation between all methods of obtaining  $G_{Ic}$  for the three adhesives (Sikaforce<sup>®</sup> 7888, Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138) was consistent, although slight differences were observed between the obtained values.

***Keywords***

Double-Cantilever Beam, adhesive joint, structural adhesive, fracture mechanics, fracture toughness.

## Résumé

L'utilisation de joints collés a augmenté ces dernières décennies en raison de leurs caractéristiques concurrentielles par rapport aux méthodes traditionnelles, telles que le soudage, le rivetage ou l'utilisation de boulons. En effet, les assemblages collés sont plus légers, ils se comportent bien sous des charges cycliques, ils permettent l'utilisation de différents matériaux et sont moins sensibles aux tensions. Pour accroître la confiance dans le projet de structures collées, il est nécessaire de prévoir avec exactitude leur résistance mécanique. L'approche mécanique de la rupture est souvent appliquée par une analyse de l'énergie, où le principal paramètre à déterminer, pour la prédiction de l'évolution des dommages et de la rupture, est le taux de libération de l'énergie critique ( $G_c$ ). Ce paramètre peut être encore divisé en composant de traction ( $G_{Ic}$ ) et de coupe ( $G_{IIc}$ ). Plusieurs auteurs ont récemment abordé le sujet de la détermination de la valeur du  $G_{Ic}$  des couches minces de colles dans des assemblages collés. La plupart des travaux publiés sur la caractérisation de la rupture en traction utilisent le test *Double Cantilever Beam* (DCB). Les principaux avantages d'essai DCB sont sa simplicité et la possibilité d'obtenir  $G_{Ic}$  mathématiquement en utilisant la théorie des poutres.

Ce travail prétend déterminer la valeur des joints collés  $G_{Ic}$  entre des composants en acier par des tests de DCB, considérant des adhésifs avec différents degrés de ductilité. On utilise principalement la méthode d'intégration  $J$ , pour que la valeur estimée de  $G_{Ic}$  tienne compte de la plasticité des adhésifs étudiés. On emploie pour le calcul intégral de  $J$ , une méthodologie de mesure optique développée par l'estimation de l'ouverture de la fissure et de la rotation des substrats de l'extrémité de la fissure. Le processus s'appuie sur une sous-routine en Matlab® pour l'extraction automatique de ces valeurs. En revanche, la loi cohésive de la résistance de l'adhésif est obtenue par la méthode directe. La méthode de l'intégrale  $J$  est aussi comparée à des méthodes plus traditionnelles d'évaluation de  $G_{Ic}$  (méthodes traditionnelles qui requièrent la mesure de la longueur de la fissure et les méthodes basées sur la longueur équivalente de la fissure).

La corrélation entre tous les procédés d'obtention  $G_{Ic}$  pour les trois adhésifs (Sikaforce<sup>®</sup> 7888, Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138) était conforme, mais on observe de légères différences entre les valeurs obtenues.

### ***Mots-clés***

Double-Cantilever Beam, assemblage collé, adhésif structural, mécanique de la rupture, ténacité.

# Índice

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	XI
RESUME.....	XIII
ÍNDICE .....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XXI
NOMENCLATURA.....	XXIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 Características das ligações adesivas .....	7
2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas .....	9
2.1.3 Tipos de juntas mais comuns .....	15
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	20
2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais.....	20
2.2.2 Tipos de adesivos estruturais.....	20
2.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRACTURA .....	25
2.3.1 Modo I.....	27
2.3.2 Modo II.....	28
2.3.3 Modo misto I + II .....	30
2.4 MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO $G_{Ic}$ .....	33
2.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda .....	34
2.4.1.1 Compliance Calibration Method .....	34
2.4.1.2 Corrected Beam Theory .....	35
2.4.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente.....	36
2.4.2.1 Compliance-Based Beam Method.....	36
2.4.3 Método baseado no integral-J.....	38
2.4.3.1 Determinação dos parâmetros por sensores mecânicos .....	40
2.4.3.2 Determinação dos parâmetros por métodos ópticos .....	40
<b>3 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>43</b>
3.1 ADESIVOS TESTADOS .....	43
3.1.1 SikaForce® 7888.....	43

3.1.2	<i>Araldite® 2015</i> .....	44
3.1.3	<i>Araldite® AV138</i> .....	46
3.2	SUBSTRATOS UTILIZADOS.....	47
3.2.1	<i>Material</i> .....	47
3.2.2	<i>Fabrico</i> .....	48
3.3	FABRICO DOS PROVETES DCB.....	49
3.3.1	<i>Preparação dos substratos</i> .....	50
3.3.2	<i>Colocação de espaçadores calibrados</i> .....	51
3.3.3	<i>Colagem e cura dos provetes</i> .....	53
3.3.4	<i>Preparação para os ensaios</i> .....	56
3.4	ENSAIO DOS PROVETES DCB.....	60
3.4.1	<i>Geometria dos provetes</i> .....	61
3.4.2	<i>Condições de ensaio</i> .....	61
3.4.3	<i>Método óptico utilizado neste trabalho</i> .....	62
3.4.3.1	Identificação dos pontos das imagens.....	63
3.4.3.2	Computação de $\delta_i$ .....	64
3.4.3.3	Computação de $\theta_0$ .....	65
3.4.4	<i>Preparação do sistema óptico</i> .....	66
3.4.5	<i>Realização dos ensaios</i> .....	67
3.4.6	<i>Adesivo SikaForce® 7888</i> .....	68
3.4.6.1	Determinação do $G_{Ic}$ .....	71
3.4.6.2	Determinação da lei coesiva em tracção.....	75
3.4.7	<i>Adesivo Araldite® 2015</i> .....	76
3.4.7.1	Determinação do $G_{Ic}$ .....	78
3.4.7.2	Determinação da lei coesiva em tracção.....	82
3.4.8	<i>Adesivo Araldite® AV138</i> .....	83
3.4.8.1	Determinação do $G_{Ic}$ .....	85
3.4.8.2	Determinação da lei coesiva em tracção.....	90
3.5	COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES ADESIVOS ESTUDADOS.....	91
4	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DO DESMOLDANTE LOCTITE® 770-NC.....	105
	ANEXO B. FOLHA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6082-T651.....	107
	ANEXO C. FOLHA DE DADOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7888.....	111
	ANEXO D. FOLHA DE DADOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	115
	ANEXO E. FOLHA DE DADOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	121



## Índice de Figuras

Figura 1: Disciplinas envolvidas na ciência da adesão (2).....	6
Figura 2: Tipo de esforços em juntas adesivas:.....	9
Figura 3: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de tracção (8).....	10
Figura 4: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de compressão (8).....	10
Figura 5: Distribuição da tensão corte numa junta sob esforço de corte(8). ....	11
Figura6: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de clivagem(8).....	12
Figura7: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de arrancamento(8).....	13
Figura8: Plastificação dos adesivos(8).....	13
Figura9: Modos de rotura em juntas adesivas(7). ....	14
Figura10: Tipos de juntas mais comuns (6; 16). ....	16
Figura11: Picos de tensão corte nas extremidades da junta de sobreposição simples(18). ....	16
Figura12: Distribuição da tensão de corte na junta sobreposição simples e na junta de chanfro exterior(19).....	17
Figura13: Junta cobre-junta dupla chanfrada e cobre-junta dupla embutida(8).....	18
Figura14: Distribuição da tensão axial numa junta de topo sob carregamento axial e não axial(8). 18	
Figura15: Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais(20). ....	19
Figura 16: Grupos de adesivos estruturais mais representativos.....	21
Figura17: Modos principais de sollicitação das fendas (26). ....	27
Figura18: Combinação entre os modos principais de carregamento.....	27
Figura 19: Representação esquemática com sollicitação aplicada do provete DCB (34). ....	28
Figura 20: Configurações possíveis de ensaio para Modo II (35).....	29
Figura21: Configurações de ensaios para Modo Misto I+II(26). ....	31
Figura22: Configuração esquemática do ensaio MMB. ....	32
Figura23: Decomposição do ensaio MMB nos ensaios DCB e ENF.....	32
Figura24: Geometria do provete DCB adoptado pela norma ASTM D3433-99(dimensões em mm). ....	33
Figura 25: Geometria do ensaio CDCB adoptado pela norma ASTM D3433-99.....	34
Figura 26: Representação esquemática da obtenção do factor de correlação do comprimento de fenda inicial(54). ....	37
Figura27: Representação esquemática da ZPF e do conceito de comprimento de fenda equivalente(34).....	38
Figura28: Contorno arbitrário em torno da ponta da fenda.....	39
Figura 29: Formato comercial do adesivo SikaForce® 7888 e pistola de aplicação.....	44
Figura 30: Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml e pistola de aplicação.....	45
Figura 31: Formato comercial do adesivo Araldite® AV138. ....	46
Figura 32: Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651(64).....	48
Figura33: Representação esquemática dos provetes DCB.....	49

Figura34:Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.....	50
Figura 35:Granalhagem dos substratos a seco.....	50
Figura 36:Limpeza dos substratos.....	51
Figura37:Representação esquemática dalocalização dos espaçadores.....	51
Figura38:Fabrico do espaçador frontal (lâmina).....	52
Figura 39:Forno com os espaçadores para cura do desmoldante.....	52
Figura 40:Substrato inferior com os espaçadores colocados.....	53
Figura 41:Substratos com espaçadores posicionados para aplicação do adesivo.....	53
Figura 42:Deposição dos adesivos SikaForce® 7888 (a) e Araldite® 2015(b) no substrato inferior.....	54
Figura 43:Pesagem dos componentes e homogeneização da mistura do Araldite® AV138.....	55
Figura 44:Provetes DCB após colagem e montagem, com colocação de pinças para aplicação de pressão durante a cura.....	55
Figura 45:Remoção do separador frontal de um provete DCB.....	56
Figura 46:Remoção com alicate do excesso de adesivo de um provete DCB.....	56
Figura 47:Limpeza com mó do excesso de adesivo de um provete DCB.....	57
Figura 48:Acabamento da superfície lateral de um provete DCB.....	57
Figura 49:Colagem da primeira dobradiça no provete DCB.....	58
Figura 50:Aplicação de tinta correctora numa face lateral do provete DCB.....	58
Figura 51:Posicionamento das escalas na face lateral do provete DCB.....	59
Figura 52:Provetes DCB com escalas coladas.....	59
Figura 53:Face lateral do provete captada pela câmara.....	61
Figura 54: Identificação dos pontos para determinar o $\theta_0$ e $\delta_i$ .....	62
Figura 55: Meio óptico utilizado nos ensaios.....	63
Figura 56: Identificação da região fotografada nos ensaios.....	64
Figura 57: Identificação das rectas $l_1$ e $l_2$ usadas para determinar $\theta_0$ .....	66
Figura 58Provete colocado nas maxilas da Shimadzu AG-X 100.....	66
Figura 59:Provete e meio óptico posicionado para realização do ensaio.....	67
Figura 60: <i>Setup</i> do ensaio, com provete sob tracção e equipamento fotográfico.....	68
Figura 61:Posições inicial e propagação da fenda a 30 mm de um dos ensaios.....	68
Figura 62:Evolução das curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7888.....	69
Figura 63:Superfícies de rotura do adesivo SikaForce® 7888.....	70
Figura 64:Curvas- $R$ determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo SikaForce® 7888.....	71
Figura 65:Evolução de $\theta_0$ no ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.....	72
Figura 66:Evolução do $\delta_i$ no ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888: Curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.....	73
Figura 67:Lei $G_I-\delta_i$ experimental de ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888 e ajuste de curva polinomial.....	74
Figura 68:Lei $\sigma_I-\delta_i$ experimental de ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888 e aproximação trapezoidal.....	75
Figura 69:Evolução das curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015.....	76
Figura 70:Superfícies de rotura do adesivo Araldite® 2015.....	77

Figura 71:Curvas- $R$ determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo Araldite® 2015.....	78
Figura 72:Evolução de $\theta_0$ no ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada. ....	79
Figura 73:Evolução de $\delta_1$ no ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada. ....	80
Figura 74:Lei $G_I$ - $\delta_1$ experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015 e ajuste de curva polinomial.....	81
Figura 75:Lei $\sigma_I$ - $\delta_1$ experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015 e aproximação trapezoidal. ....	82
Figura 76:Evolução das curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® AV138.....	83
Figura 77:Superfícies de rotura do adesivo Araldite® AV138. ....	84
Figura 78:Curvas- $R$ determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo Araldite® AV138.....	86
Figura 79:Evolução de $\theta_0$ no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada. ....	87
Figura 80:Evolução de $\delta_1$ no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada. ....	88
Figura 81:Lei $G_{Ic}$ - $\delta_1$ experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138 e ajuste de curva polinomial.....	89
Figura 82:Lei $\sigma_I$ - $\delta_1$ experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138,e aproximação trapezoidal e triangular. ....	90
Figura 83:Tendência de $G_{Ic}$ do adesivo SikaForce® 7888 pelos vários métodos. ....	91
Figura 84:Média do valor de $G_{Ic}$ do adesivo SikaForce® 7888 pelos vários métodos. ....	92
Figura 85:Tendência de $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.....	92
Figura 86:Média do valor de $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.....	93
Figura 87:Tendência de $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos. ....	93
Figura 88:Média do valor de $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos.....	94
Figura 89:Média do valor de $G_{Ic}$ encontrado pelos quatro métodos para os três adesivos.....	94
Figura 90:Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (71).....	95



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo SikaForce® 7888 (61).....	44
Tabela 2 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® 2015 (62).....	45
Tabela 3 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 (62).....	46
Tabela 4 – Composição química (%) da liga de alumínio AW 6082-T651 (63).....	47
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082 T651 (63).....	47
Tabela 6 – Dimensões teóricas dos provetes DCB (em mm).....	49
Tabela 7 – Dimensões efectivas dos 18 provetes DCB.....	60
Tabela 8 – Valores de $P_{máx}$ , $\delta_{Pmáx}$ , $\delta_{máx}$ , $E_{Pmáx}$ e $E_{\delta máx}$ para o adesivo SikaForce® 7888.....	70
Tabela 9 – Valores de $G_{Ic}$ pelos quatro métodos para SikaForce® 7888.....	74
Tabela 10 – Valores de $P_{máx}$ , $\delta_{Pmáx}$ , $\delta_{máx}$ , $E_{Pmáx}$ e $E_{\delta máx}$ para o adesivo Araldite® 2015.....	78
Tabela 11 – Valores de $G_{Ic}$ (em N/mm) pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® 2015.....	81
Tabela 12 – Valores de $P_{máx}$ , $\delta_{Pmáx}$ , $\delta_{máx}$ , $E_{Pmáx}$ e $E_{\delta máx}$ para o adesivo Araldite® AV138.....	85
Tabela 13 – Valores de $G_{Ic}$ (em N/mm) pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® AV138. ...	89



## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$a$  - Comprimento da fenda

$b$  - Semi comprimento da fenda

$a_{eq}$  - comprimento de fenda equivalente

$a_0$  - Comprimento de fenda inicial

$B$  - Largura do provete em mm

$c$  - Metade da espessura do substrato ( $c = h/2$ )

$C$  - Flexibilidade do provete

$C_0, C_1, C_2, C_3$  - Constantes do polinómio cúbico para determinação da flexibilidade

$E$  - Módulo de elasticidade

$E_f$  - módulo de elasticidade equivalente

$E_{Pmáx}$  - Energia à força de tracção máxima

$E_{\delta máx}$  - Energia ao deslocamento máximo

$E_f$  - módulo de elasticidade equivalente

$F_{ty}$  - Tensão de cedência à tracção do metal do provete

$G$  - Energia de fractura

$G_c$  - Energia crítica de fractura

$G_I$  - Energia de fractura em modo I

$G_{Ic}$  - Energia crítica de fractura em modo I

$G_{IIc}$ - Energia crítica de fractura em modo II

$G_{13}$ - Módulo de corte de um material ortotrópico

$h$  - Espessura do provete normal ao plano de colagem

$I$ - Momento estático de 2ª ordem da secção recta de cada substrato

$K$ - Tenacidade à fractura

$K_C$ - Tenacidade critica à fractura

$K_I$ - Tenacidade à fractura em modo I

$K_{II}$ - Tenacidade à fractura em modo II

$L$ - Comprimento do provete

$M_F$  - Momento flector

$P$  - Força de tracção aplicada

$P_{\max}$  - Força de tracção máxima aplicada

$T$  - Carga máxima de inicio da propagação da fenda majorada em 150%

$t$  - Tempo

$w$  - Espessura do adesivo

$U$  - Energia de deformação do provete, devido aos efeitos de flexão e de corte

$V$ - Esforço transversal em cada substrato

$W$  - Densidade de energia de deformação

$W_f$ - Energia de fractura

$Y$ - Factor adimensional que depende da geometria e distribuição de carga



## Caracteres Gregos

$\delta$  - Deslocamento dos pontos de aplicação da carga

$\delta_i$  - Abertura na ponta da fenda

$\delta_c$  - Abertura de rotura da fenda

$\delta_{\text{máx}}$  - Deslocamento máximo dos pontos de aplicação da carga

$\delta_{p\text{máx}}$  - Deslocamento dos pontos de aplicação da carga à força máxima

$\sigma$  - Tensão de tracção

$\sigma_I$  - Tensão de tracção em modo I

$\sigma_u$  - Tensão critica de tracção

$\tau$  - Tensão de corte ao longo da espessura de substrato

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\gamma$  - Energia de superfície do material

$\theta_0$  - Rotação dos aderentes na ponta da fenda

$\theta_p$  - Rotação dos aderentes na linha da carga

## Operadores

$\pi$  - Pi

$\psi$  - Rácio de modos II/I

$\Delta$  - Factor de correcção para a rotação e deslocamento do aderente junto à frente da fenda

## **Abreviaturas**

ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

ADCB - *Asymmetric Double Cantilever Beam*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CBBM - *Compliance-Based Beam Method*

CBT - *Corrected Beam Theory*

CCM - *Compliance Calibration Method*

CDCB - *Contoured Double Cantilever Beam*

CDI - *Correlação Digital de Imagem*

CLS - *Crack Lap Shear*

CZM - *Cohesive Zone Model*

DCB - *Double Cantilever Beam*

ENF - *End Notched Flexure*

ELS - *End Loaded Split*

FPB - *Four Point Bending*

FRMM - *Fixed Ratio Mixed Mode*

ISEP - *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

LVDT - *Linear Variable Differential Transformers*

MMB - *Mixed Mode Bending*

PS - *Polystyrene*

PVC - *Polyvinyl Chloride*

SLB - *Single Leg Bending*

SI – Sistema Internacional

UV - Ultravioleta

ZPF - Zona de Processo de Fractura

4ENF - *Four-Point End Notched Flexure*



# 1 Introdução

## 1.1. Contextualização

Os modelos de dano coesivos têm vindo a demonstrar a sua potencialidade como modelos de previsão do comportamento mecânico de juntas coladas. Todavia, estes modelos requerem o estabelecimento prévio de uma lei coesiva que está intrinsecamente associada ao comportamento do material e da estrutura.

Foram fabricados e ensaiados vários provetes para os três adesivos estudados (Sikaforce<sup>®</sup> 7888, Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138) utilizando o ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB) para medição de  $G_{Ic}$ , sendo registados os valores da força ( $P$ ), deslocamento ( $\delta$ ) e tempo ( $t$ ) durante os ensaios. Para a obtenção de  $G_{Ic}$  foi necessário medir o comprimento de fenda ( $a$ ). Para tal, foi utilizada uma câmara digital para a captação de imagens de 5 em 5 segundos da zona de propagação da fenda. Recorrendo a um software através de algoritmos de processamento da imagem baseado na comparação do padrão fez-se a análise das imagens tiradas no decorrer dos ensaios para determinação dos parâmetros  $a$ ,  $\delta_1$  (abertura na ponta da fenda) e  $\theta_0$  (rotação dos aderentes na ponta da fenda) para obtenção de  $G_{Ic}$  pelo método óptico. A imagem foi discretizada numa malha de unidades individuais quadrangulares, parcialmente sobreponíveis. O algoritmo de Correlação Digital de Imagem compara a imagem actual (deformada) com a imagem padrão (não deformada), as linhas verticais são automaticamente procuradas através da imagem binária da direita para a esquerda, a fim de encontrar a primeira interceptação desta linha com a ponta da fenda. Os valores de  $G_{Ic}$  são também obtidos pelo método *Compliance-Based Beam Method*(CBBM), *Corrected Beam Theory*(CBT) *Compliance Calibration Method*(CCM) e *integral-J*, e é verificada a concordância entre eles e com estudos anteriormente realizados.

Através da curva da lei coesiva em tracção  $\sigma_1$  (tensão de tracção em Modo I)- $\delta_1$  obtida experimentalmente para cada adesivo, analisa-se se a lei *Cohesive Zone Model* (CZM) trapezoidal ou triangular é adequada para representar com elevada aproximação a ductilidade adesiva.

## 1.2. Objectivos

Os objectivos principais deste trabalho sobre a utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais são:

- Testar três adesivos, dois dúcteis (SikaForce<sup>®</sup> 7888 e Araldite<sup>®</sup> 2015) e um frágil (Araldite<sup>®</sup> AV138) através do ensaio DCB em Modo I com substratos de alumínio.
- Determinar os parâmetros  $\delta_1$  e  $\theta_0$  para obtenção de  $G_{Ic}$  pelo método óptico através do integral- $J$ .
- Obtenção de  $G_{Ic}$  pelos métodos tradicionais CBBM, CCM, CBT.
- Avaliar a correspondência entre os valores obtidos de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos.
- Determinar a lei coesiva em tracção para cada adesivo ensaiado.

## 1.3. Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- no capítulo 1 é feita a contextualização e descritos os objectivos do trabalho.
- no capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema em questão, onde se pretende abordar as ligações adesivas e dar a conhecer os adesivos estruturais. São também apresentados e descritos os ensaios de fractura DCB, destinados à caracterização em Modo I, bem como a metodologia utilizada na obtenção da energia de fractura.
- no capítulo 3 é apresentado todo o procedimento experimental que envolve a caracterização dos materiais utilizados, produção dos provetes, descrição dos ensaios realizados e a análise dos resultados experimentais.

- no capítulo 4 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.





## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ligações adesivas

A utilização de adesivos encontra-se presente em inúmeros ambientes, observam-se inclusive na natureza, já que vários animais segregam líquidos viscosos capazes de unir materiais para a fabricação dos seus ninhos, até aos produzidos actualmente pelo homem, utilizando a mais avançada tecnologia. Todavia a ligação adesiva não é uma técnica recente de ligação de materiais, pois a sua utilização remonta a um passado muito longínquo. Os Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo, já empregavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores que aplicavam em trabalhos feitos em madeira e pedra (1).

A fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassada com o desenvolvimento e a introdução de adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40. Os primeiros adesivos eram bastante frágeis e fracturavam com facilidade, este problema foi também ultrapassado nos anos 40 por Bruyne e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade como, por exemplo, a combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Tal combinação representou um avanço tecnológico dos adesivos, permitindo a ligação de materiais metálicos e de madeira com elevado sucesso(2).

A existência de centenas de preparações adesivas, as constantes inovações tecnológicas e a globalização da economia requerem um estudo detalhado da relação custo benefício na escolha do material adesivo a ser utilizado, visto que diversos adesivos podem ser utilizados para ligar, por adesão superficial, peças diferentes. Assim, actualmente é dada a denominação "adesivo" a um composto utilizado para unir superfícies de dois materiais sólidos, produzindo uma junta com alta resistência (3).

O sucesso da tecnologia dos adesivos e da adesão é devido a um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em diferentes áreas do conhecimento, tais como a Química Orgânica e Físico Química de macromoléculas, Físico Química de superfícies, Mecânica da Fractura e Resistência dos materiais, além de outras. Assim, a ciência e tecnologia das ligações adesivas é uma área pluridisciplinar, que requer o domínio de conhecimento teórico e experimental numa série de disciplinas científicas, nomeadamente as ciências primárias acima mencionadas, em que a sobreposição de certas áreas forma as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projecto da junta, todas importantes na ciência da adesão (1; 3).

A **figura 1** ilustra a sobreposição das ciências primárias e a formação das disciplinas que são relevantes no desenvolvimento das ligações adesivas.

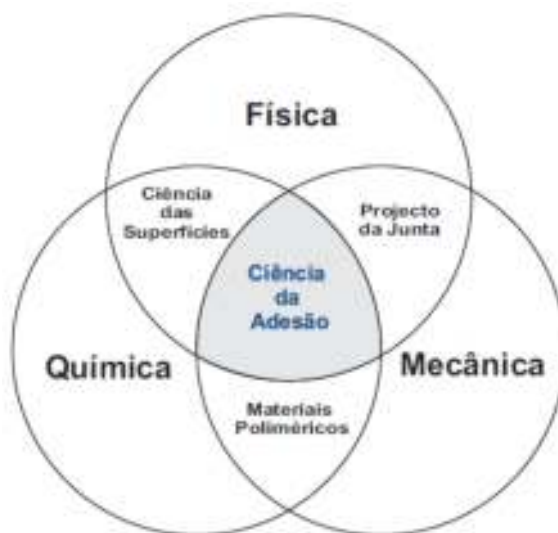


Figura 1: Disciplinas envolvidas na ciência da adesão (2).

A aplicação das ligações adesivas teve nos últimos anos um grande crescimento numa variedade de indústrias devido à introdução de adesivos sintéticos poliméricos. A grande parte dos adesivos actuais são baseados em polímeros sintéticos tais como os fenólicos, os epóxidos, os acrílicos e os uretanos. A indústria aeronáutica foi a principal responsável pelo desenvolvimento das ligações adesivas. No entanto, são cada vez mais diversificadas e comuns as suas aplicações noutras indústrias, como na automóvel, marítima, electrónica, medicina dentária, desporto e construção civil, sendo a indústria automóvel um bom exemplo desta generalização na ligação de materiais leves com o intuito de reduzir peso.

### **2.1.1 Características das ligações adesivas**

As aplicações das ligações adesivas estão a ter um elevado crescimento numa grande variedade de indústrias, pois estas ligações são capazes de suportar esforços equivalentes aos das ligações mecânicas, efectuando a transmissão eficiente da carga entre os componentes ligados, e mantendo a sua integridade estrutural durante o seu tempo de vida sob as condições a que estão sujeitas.

As ligações adesivas são particularmente interessantes para ligar materiais avançados de alta resistência, como é o caso dos compósitos de matriz polimérica. Neste caso, as ligações rebitadas e aparafusadas são alternativas muito menos eficientes do que nos materiais metálicos, devido à baixa ductilidade e à fraca resistência ao esmagamento dos compósitos (4). De entre os diferentes tipos de ligações entre sólidos, como por exemplo, a ligação soldada, a rebitada, a aparafusada e a adesiva, é esta última que tem despertado maior interesse nos investigadores(5).

A justificação para o crescente uso das ligações adesivas reside no facto desta técnica ter as seguintes vantagens (1; 2; 3; 4; 5):

- Garante uma fixação contínua e capacidade de vedação, isolamento térmico, com amortecimento de vibrações devido ao comportamento viscoelástico dos adesivos;
- Permite obter uma ligação com distribuição mais uniforme das cargas estáticas e dinâmicas, distribuindo as tensões sobre a área total da ligação ao contrário de concentrá-las apenas em determinados pontos. A montagem com adesivos é mais resistente à fadiga, motivada pela ausência do efeito de concentração de tensões pela não existência de furos na ligação;
- Possibilita realizar juntas de ligação simples com elevada resistência mecânica, se a junta for bem concebida, com obtenção de importantes reduções de custo de fabrico e de ligação;
- Permite o fabrico de formas complexas e obtenção de uma boa aparência estética das peças. Depois da montagem as costuras de ligação não são visíveis, ao contrário do que acontece com a soldadura;

- Possibilita a união de diferentes materiais, com redução de peso e do número de peças em relação às ligações aparafusadas e rebitadas;
- Minimiza os problemas de corrosão, sobretudo nas ligações de materiais diferentes. Não há alterações estruturais, e as menores temperaturas de processamento não afectam as propriedades dos materiais, quando comparado com o processo de soldadura.

Todos os processos de ligação têm vantagens e desvantagens, logo a ligação adesiva não é excepção. As principais limitações ou desvantagens inerentes à generalidade das ligações com adesivos são (1; 2; 3; 4; 5):

- Para obter bons resultados é geralmente necessário uma cuidada preparação das superfícies, por vezes complexa, morosa e dispendiosa através de, por exemplo, abrasão mecânica, ataques químicos, desengorduramento, etc., para garantir uma boa adesão e durabilidade da ligação;
- Geralmente a durabilidade das juntas adesivas é influenciada pela degradação e limitação da resistência dos adesivos, quando expostos a condições extremas de calor, humidade, radiação UV, água, etc.;
- A ligação não é realizada instantaneamente, o que torna necessário a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição. Se as peças não forem coladas com suficiente precisão, após o endurecimento do adesivo não é possível a sua desmontagem sem destruição da junta, tornando assim impossível rectificar a ligação;
- O tempo de cura dos adesivos é relativamente longo e por vezes a cura deve ser realizada a elevadas temperaturas;
- O controlo de qualidade e a inspecção são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas;
- A ausência de um critério universal de dimensionamento que permita projectar qualquer estrutura poderá ser uma das grandes desvantagens na utilização dos adesivos.

### 2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

As juntas são sempre pontos potencialmente mais fracos da estrutura, independentemente do tipo de ligação utilizado. As juntas adesivas devem merecer uma atenção especial no projecto e na construção. Um dos princípios básicos na concepção correcta das juntas adesivas é que o adesivo deve ser solicitado ao corte. Este princípio tira partido do facto da ductilidade ao corte ser normalmente muito superior do que a ductilidade à tracção. Os adesivos são colocados entre as superfícies dos substratos, e o mecanismo de união depende da força de união do adesivo ao substrato, ou adesão, e da força interna do adesivo, ou coesão. Em geral, a resistência de uma junta adesiva depende da distribuição de tensões no adesivo, e é influenciada pela geometria da junta e pelas propriedades mecânicas do adesivo e dos aderentes(6).

São cinco os tipos de esforços a que as juntas adesivas podem estar submetidas(1; 7): tracção, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

A **figura 2** ilustra os tipos de esforços em juntas adesivas.

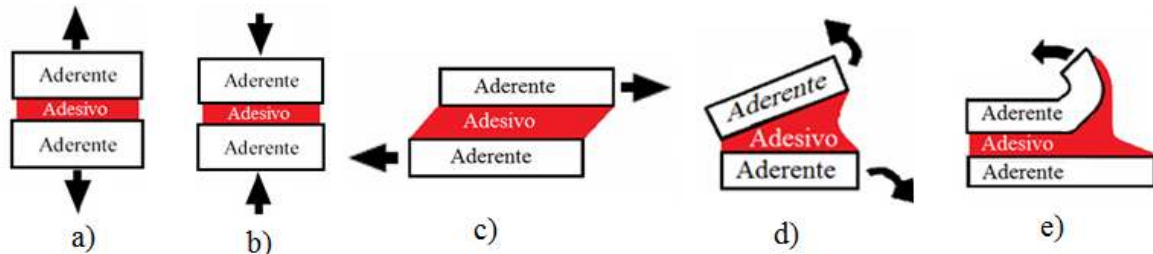


Figura 2: Tipo de esforços em juntas adesivas:

a) tracção; b) compressão; c) corte; d) clivagem; e) arrancamento.

#### Esforços de tracção:

As tensões de tracção desenvolvem-se quando as forças actuates são distribuídas uniformemente ao longo da área colada, perpendicularmente ao plano da junta. Na realidade a espessura da cola é difícil de controlar pelo que, na prática, as forças raramente são rigorosamente axiais. Assim, na junta adesiva a distribuição de tensões não é uniforme,

originando picos de tensões indesejáveis de arrancamento ou clivagem nas extremidade da zona de sobreposição(7; 8), (**figura 3**).

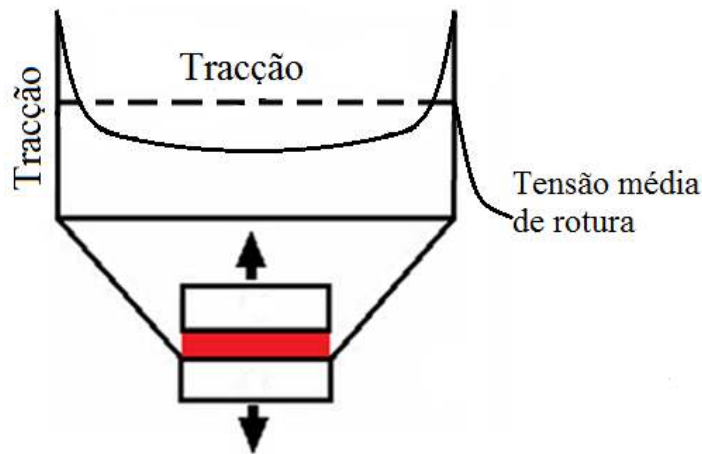


Figura 3:Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de tracção (8).

### Esforços de compressão:

As tensões de compressão desenvolvem-se quando as forças actuantes tendem a comprimir um aderente contra o outro, sendo distribuídas uniformemente ao longo da área colada perpendicularmente ao plano da junta.

A distribuição da tensão de compressão pelo adesivo é constante(1; 7),(**figura 4**).

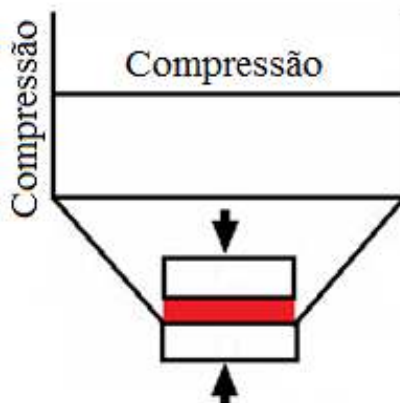


Figura 4: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de compressão (8).

Na realidade, uma ligação em compressão pura quase não necessita de adesivo. O revestimento do solo é uma das aplicações onde a junta adesiva é solicitada a esforço de compressão.

### Esforços de corte:

As tensões de corte desenvolvem-se quando as forças actuantes estão no plano do adesivo provocando o escorregamento entre os dois aderentes (7; 9). A distribuição da tensão de corte pelo adesivo numa junta de sobreposição simples é esquematizada na **figura 5**. Note-se que as extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões que a parte central da ligação (8; 10; 11). A tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades da junta e mínima no meio, comportamento este que se deve ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da ligação(10; 11).

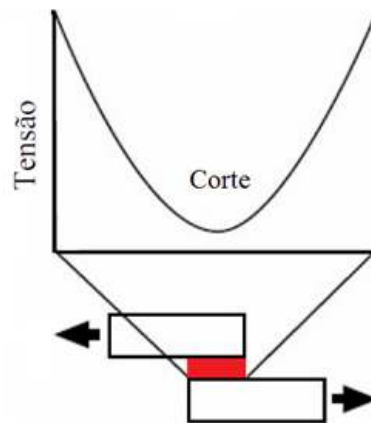


Figura 5: Distribuição da tensão corte numa junta sob esforço de corte(8).

Um princípio fundamental na concepção das juntas adesivas é que o adesivo deve transmitir preferencialmente esforços de corte. As juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas maioritariamente ao corte, pois toda a área colada contribui e é relativamente fácil manter os aderentes alinhados. A tensão de corte média é obtida dividindo a força aplicada pela área colada(8).

### Esforços de clivagem:

As tensões de clivagem ocorrem quando forças na extremidade de uma junta rígida actuam de forma a afastar os aderentes. A distribuição da tensão no adesivo quando os aderentes são submetidos a um esforço de clivagem é esquematizada na **figura6**. A tensão máxima ocorre na extremidade solicitada e diminui gradualmente ao longo da camada adesiva, estendendo-se num comprimento considerável(7; 8).

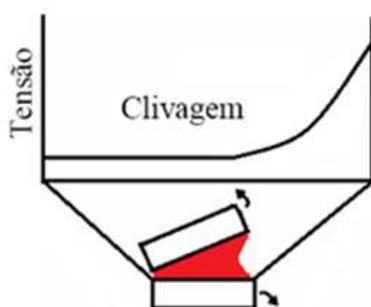


Figura6: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de clivagem(8).

Os esforços de clivagem devem, sempre que possível, ser evitados em juntas adesivas, devendo utilizar-se configurações que suportem maioritariamente esforços de corte. Nas juntas adesivas topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais, podem também acontecer esforços de clivagem que nem sempre podem ser desprezados (10).

### Esforços de arrancamento:

O esforço de arrancamento é um caso algo semelhante ao verificado para os esforços de clivagem. No entanto, no caso do arrancamento um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por acção das forças aplicadas, o que leva à concentração das forças de tracção numa zona muito mais localizada numa das extremidades da junta(8).

A distribuição da tensão no adesivo é esquematizada na **figura 7**.



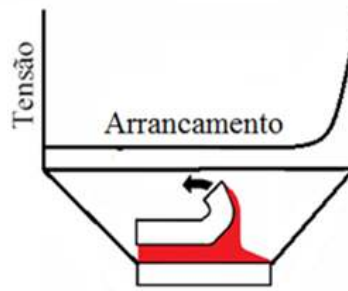


Figura7: Distribuição da tensão axial numa junta sob esforço de arrancamento(8).

Tal como os esforços de clivagem, também os esforços de arrancamento devem sempre que possível ser evitados, devendo-se utilizar configurações de juntas que suportem maioritariamente os esforços de corte. A clivagem ainda é mais gravosa do que o arrancamento.

Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis a este tipo de esforços, uma vez que o dano no adesivo se inicia nas extremidades da ligação para deformações do adesivo muito reduzidas. Por outro lado, os adesivos dúcteis e flexíveis permitem uma plastificação do adesivo nestas regiões e transferência dos esforços para a zona interior do adesivo, o que conduz a uma maior resistência da junta(8)(**figura 8**).

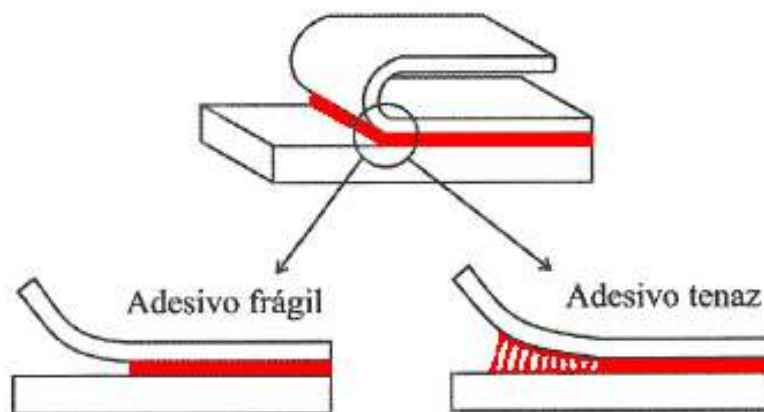


Figura8:Plastificação dos adesivos(8).

De uma forma geral, as juntas adesivas sujeitas a esforços de clivagem e de arrancamento são menos resistentes do que as solicitadas principalmente ao corte, porque as tensões de

clivagem e arrancamento se concentram normalmente em zonas mais localizadas da ligação adesiva (numa ou nas duas extremidades da ligação)(10; 11).

Numa ligação ideal, o substrato deve ser o elo mais fraco. Todavia, na maior parte das ligações adesivas realizadas adequadamente, o adesivo é o elo mais fraco porque as forças de adesão entre adesivo e substrato são mais fortes do que as forças de coesão que actuam no seio do adesivo (6; 7).

De uma forma geral, os modos de rotura mais frequentes nas juntas adesivas são os indicados na **figura 9**(7).

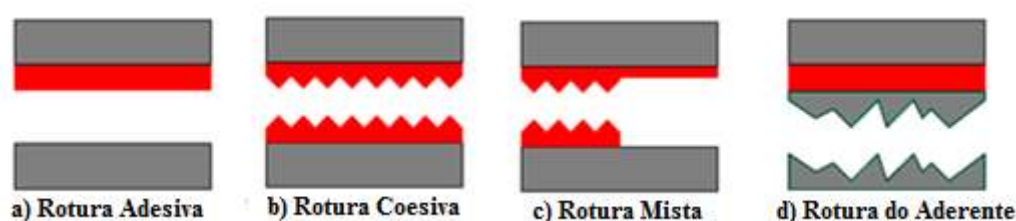


Figura9: Modos de rotura em juntas adesivas(7).

**Rotura adesiva (a):**A rotura adesiva ocorre na interface entre um dos aderentes e o adesivo, também referida como falha interfacial. Após a rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta vestígios de adesivo e a superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo(12; 13).

A causa principal da rotura adesiva é a preparação inadequada das superfícies dos substratos(13). A acção específica da preparação da superfície consiste normalmente em:

- Remoção da superfície de óleos e gorduras, pó e outras partículas de contaminação, agentes de desmoldagem;
- Alteração da topologia da superfície criando uma superfície mais rugosa e capilar, assim como criação de uma estrutura alveolar de óxido que favoreça o encaixe mecânico com o adesivo;
- Alteração química da camada superficial para favorecer a atracção electrostática ao nível atómico através das ligações secundárias ou de van der Waals.

Os tratamentos superficiais controlam e protegem os substratos antes da colagem e também impedem a superfície de se alterar após a colocação da junta em serviço. O seu objectivo principal é obter uma rotura coesiva e não adesiva, no adesivo ou no substrato. A rigidez dos aderentes e adesivos influencia a resistência da junta, já que quanto mais rígidos os aderentes mais uniforme é a distribuição dos esforços na junta (14).

Nas juntas adesivas, em geral, existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo. Os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface(15). Isto também pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva ou muito próxima de um dos substratos. Saliente-se ainda que muitas roturas consideradas inicialmente adesivas são, na realidade, roturas coesivas. De facto, uma observação rigorosa da superfície do substrato revela, por vezes, a existência de uma fina película de adesivo(13).

**Rotura coesiva (b):**A rotura coesiva ocorre na região interna do adesivo, quando a resistência do adesivo é menor que a resistência entre adesivo e aderentes. Após a rotura verifica-se que a superfície de ambos os aderentes está coberta de adesivo(3; 12; 13).

**Rotura mista (c):**A rotura mista consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva. Por vezes, este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo do próprio adesivo(12; 13).

**Rotura de um dos aderentes (d):**A rotura de um dos aderentes ocorre na região interna do aderente quando a resistência do aderente é menor do que a resistência do adesivo. Este modo de rotura é geralmente conhecido como rotura coesiva do aderente ou do substrato (12; 13).

### 2.1.3 Tipos de juntas mais comuns

Há várias configurações de juntas nas ligações adesivas. A distribuição de tensões ao longo da junta depende principalmente da sua geometria e também das propriedades mecânicas do adesivo e do substrato(16).As juntas mais comuns são a de sobreposição simples, sobreposição dupla, chanfro e juntas de degrau(6; 16)(**figura 10**).

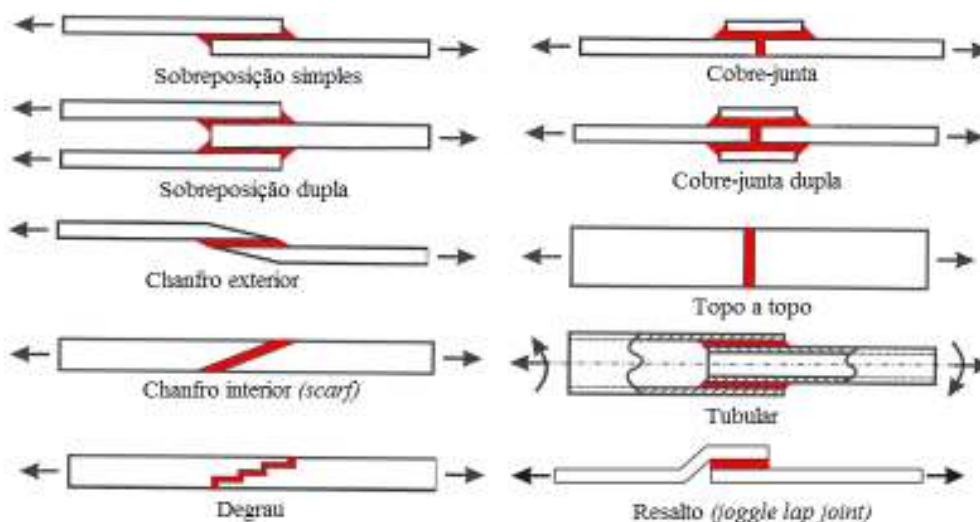


Figura10: Tipos de juntas mais comuns (6; 16).

**Junta de sobreposição simples:** A junta de sobreposição simples é a mais usual em aplicações industriais e a mais simples de fabricar(6; 13). A carga é transferida de uma peça para a outra através do esforço de corte na zona adesiva. Neste tipo de juntas, a aplicação descentrada da carga provoca a flexão dos substratos, produzindo uma rotação da junta que altera a linha de aplicação da carga na zona de sobreposição, originando o aparecimento de tensões normais na direcção da espessura do adesivo (arrancamento)(6; 16; 17). Nos bordos ocorre um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da espessura total. Os dois efeitos combinados (flexão e mudança brusca da secção) ocorrem na zona mais crítica provocando um pico da tensão de corte, e uma redução na resistência da junta. Para minimizar este problema pode recorrer-se a juntas de sobreposição dupla, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores(16; 18)(**figura 11**).

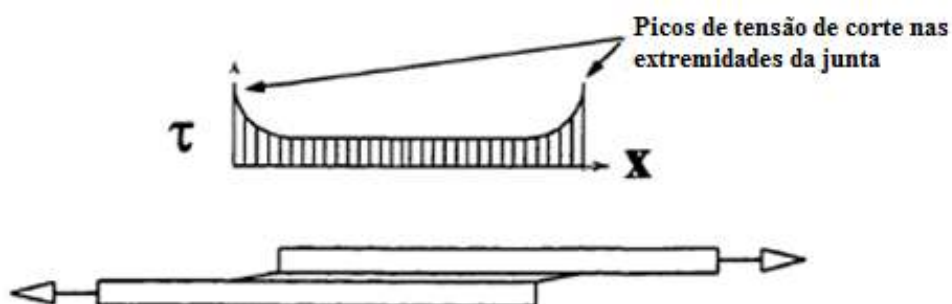


Figura11: Picos de tensão corte nas extremidades da junta de sobreposição simples(18).

**Junta de sobreposição dupla:** A junta de sobreposição dupla foi desenvolvida para minimizar a flexão existente na junta de sobreposição simples. No entanto, a fabricação é mais morosa, e nem sempre possível realizar(18). A junta de sobreposição dupla apresenta uma configuração simétrica que se supõe isenta de flexão, no entanto, na linha de adesão, podem desenvolver-se tensões de tracção e compressão, desde que os substratos exteriores sofram flexão(18).

**Junta de chanfro exterior:** Os picos de tensão de corte que ocorrem nas extremidades da junta de sobreposição simples podem ser reduzidos através da modificação geométrica do aderente nessa região, chanfrando as suas extremidades. Esta modificação da geometria resulta numa diminuição da concentração de tensões com distribuição mais uniforme desta(8; 18; 19)(figura 12).

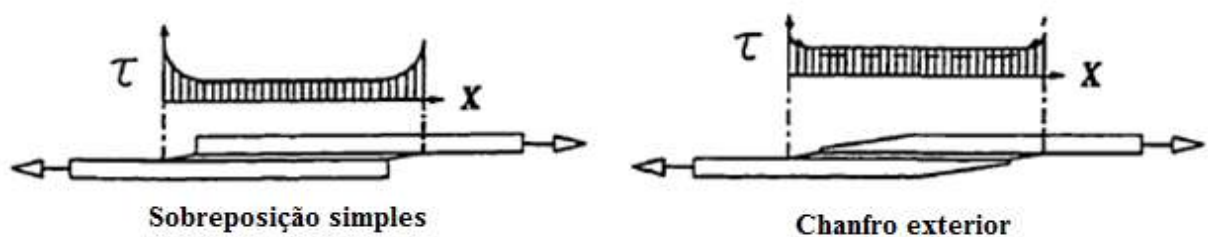


Figura12: Distribuição da tensão de corte na junta sobreposição simples e na junta de chanfro exterior(19).

**Junta chanfro interior(*scarf*):** A junta chanfro interior, assim como **ajunta em degraus**, produzem a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, aumentando a sua resistência. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto(17). A dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas encarecem o seu processo de fabrico(16). Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, eliminando assim as operações de maquinagem (18).

**Junta com cobre junta, simples e dupla:** Estas juntas apresentam resistência superior às juntas de sobreposição simples e topo a topo. A cobre junta simples é também sujeita a

esforços de arrancamento, enquanto a de cobre junta dupla reduz o momento flector, sendo por isso preferível (8; 19).

A **junta cobre junta dupla chanfrada**, ou a de **cobre junta embutida** são as desejáveis para resistir aos esforços de flexão(**figura 13**). Infelizmente ambas requerem maquinagem que poderá ser dispendiosa (19).



Figura13:Junta cobre-junta dupla chanfrada e cobre-junta dupla embutida(8).

**Juntas topo a topo:** As juntas topo a topo são as mais simples de fabricar. No entanto, não devem suportar esforços de flexão, pois o adesivo ficaria sujeito a clivagem (**figura 14**). A acentuada concentração de tensões de arrancamento nas suas extremidades faz com que não apresentem uma eficácia elevada(8; 19).

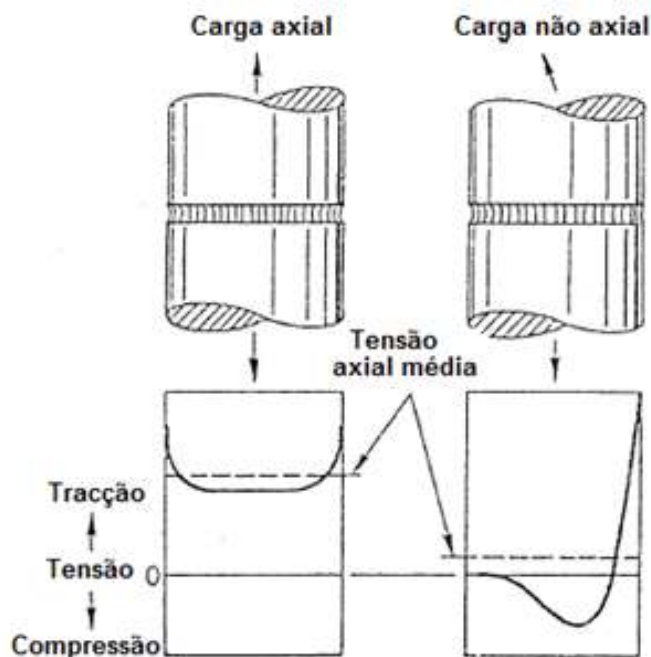


Figura14: Distribuição da tensão axial numa junta de topo sob carregamento axial e não axial(8).

**Junta tubular:** A junta tubular consiste na união de tubos, pode ter a extremidade quadrada ou em chanfro. Tem boa resistência a esforços de tracção e compressão, podendo gerar-se esforços de arrancamento caso não exista um alinhamento relativo ao eixo de revolução. Para tentar anular este efeito, utilizam-se habitualmente chanfros, canais e ressalto, facilitando assim a inserção de peças, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico(20)(**figura 15**).A inacessibilidade do seu interior impossibilita a sua inspecção. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar, são algumas das soluções para assegurar que o adesivo preencha toda a cavidade.

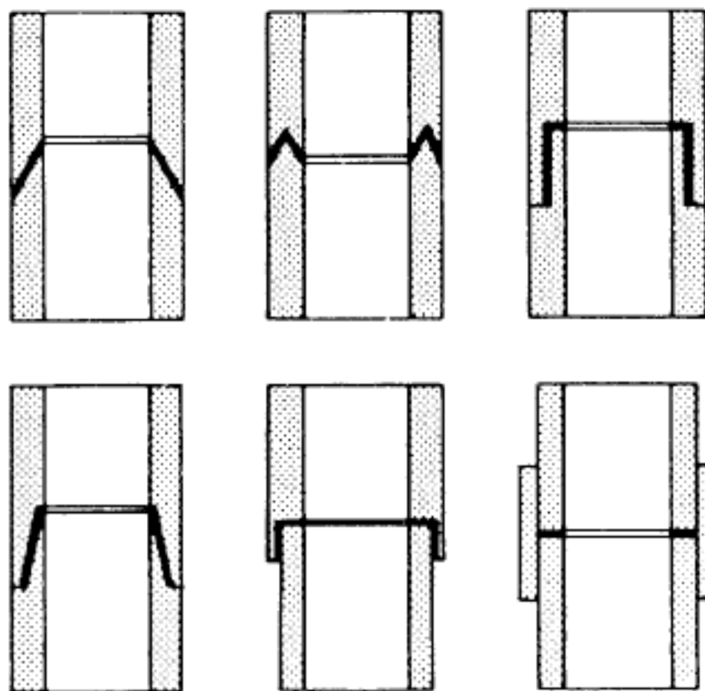


Figura15: Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais(20).

**Junta de ressalto:** A junta de ressalto é a solução mais fácil para garantir o alinhamento das forças (*joggle lap joint*) (8). Esta junta dá uma distribuição mais uniforme da tensão. O ressalto pode ser realizado simplesmente dobrando um aderente. Contudo traz dificuldades de fabricação acrescidas para esta junta, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência.

## 2.2 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são normalmente fabricados com base em resinas termoendurecíveis modificadas, resinas termoplásticas ou elastômeros. A noção de adesivos estruturais surgiu na indústria da construção mecânica, desde que se começaram a realizar colagens capazes de suportar a transmissão de esforços de uma peça para a outra na ordem da grandeza dos envolvidos nas ligações soldadas, rebitadas e aparafusadas (21).

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Sendo o adesivo parte integrante da estrutura, em que muitas vezes constitui o principal meio de ligação, deve garantir a resistência da estrutura a ser ligada (22). Actualmente, a maioria dos adesivos estruturais utilizados são polímeros termoendurecíveis, uma vez que os termoplásticos são mais susceptíveis à fluência e à degradação de propriedades por exposição ambiental(8; 19), embora também sejam usados, com alguma frequência, adesivos cuja formulação base é termoendurecíveis, tais como os cianoacrilatos e os adesivos ditos anaeróbicos.

### 2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos podem ser classificados segundo diversos critérios, tais como: origem dos componentes primários, temperatura de cura, resistência à humidade, composição química, forma física, entre outros. Uma das classificações consiste na separação em grupos com propriedades semelhantes e intrinsecamente ligadas às características da estrutura molecular do material(21), conforme se observa na **figura 16** (grupos mais representativos).

**Adesivos Fenólicos:** Os adesivos fenólicos eram utilizados inicialmente para a ligação de madeira a madeira, passando a ser os primeiros adesivos estruturais utilizados para a ligação de metal a metal. Durante o processo de cura, realizado a altas temperaturas, ocorre libertação de água, pelo que se deve impor uma elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na zona da colagem, ou os substratos devem ser porosos (21). Em geral, apresentam um baixo custo e possuem uma boa resistência mecânica, uma boa resistência a



temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como principais limitações apontam-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao choque e a vibrações e grande fragilidade devido às elevadas tensões internas geradas pela contração durante o processo de cura. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastômero (nitrilo e policloropreno) (8; 22).

<b>Fenólicos</b>	<b>Fenólicos-vinílicos</b>
	<b>Fenólicos-nitrilo</b>
	<b>Fenólicos-policloropreno</b>
<b>Acrílicos</b>	<b>Anaeróbicos</b>
	<b>Cianoacrilatos</b>
<b>Poliuretanos</b>	
<b>Poliimidas</b>	
<b>Epóxidos</b>	<b>Epóxido-poliamida</b>
	<b>Epóxido-polisulfureto</b>
	<b>Epóxido-fenólicos</b>
	<b>Epóxido-poliuretano</b>
	<b>Epóxido-nitrilo</b>

Figura 16: Grupos de adesivos estruturais mais representativos.

- **Fenólicos-Vinílicos:** Combinam a resina fenólica com a vinílica e são termoestáveis até aos 120-130°C. Estes adesivos oferecem resistência elevada ao corte e ao arrancamento, sendo a sua resistência à fadiga boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica.
- **Fenólicos-Nitrilos:** Combinam a resina fenólica com o elastômero nitrilo. Podem ser utilizados em contínuo até temperaturas de 160°C e apresentam uma resistência aos agentes químicos bastante elevada. São utilizados para a ligação de metais, plásticos em geral, madeira, vidro e materiais cerâmicos. As desvantagens

principais relacionam-se com a fraca resistência mecânica a baixas temperaturas e com a necessidade de elevadas pressões e temperaturas para efectuar a cura.

- **Fenólicos-Policloropreno:** Combinam a resina fenólica com o elastómero policloropreno. Distinguem-se dos anteriormente apresentados por possuírem uma resistência mecânica ligeiramente superior às vibrações e às baixas temperaturas.

**Adesivos Acrílicos:** Nos adesivos acrílicos o processo de cura é realizado pela adição de agentes de polimerização, mais concretamente peróxidos geradores de radicais livres. Os radicais livres, ao reagir com os monómeros, iniciam a rápida formação de cadeias através da quebra das ligações duplas dos monómeros. Após os monómeros terem a sua ligação quebrada actuam também como agentes de polimerização. Os adesivos acrílicos foram desenvolvidos na década de 70. Estes adesivos são geralmente utilizados na ligação de termoplásticos como (*Polystyrene*) PS, (*Polyvinyl Chloride*) PVC, (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) ABS e borrachas, além de proporcionarem boa adesão em aço e alumínio(8; 22). Como vantagens são indicadas a elevada resistência à humidade, a boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contracção durante o processo de cura e permitem ligações fortes mesmo quando as superfícies não são convenientemente limpas. Como desvantagens citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e a elevada flamabilidade. Nestes incluem-se os acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e modificados.

- **Acrílicos Anaeróbicos:** São geralmente líquidos monocomponentes que se armazenam em contacto com o ar para manterem a sua forma monomérica. Podem ser curados à temperatura ambiente quando privados do contacto com o oxigénio. O adesivo fora da junta normalmente não cura dado estar em contacto com o ar, facilitando a sua remoção. Em geral, são excelentes vedantes, e a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C.
- **Acrílicos Cianoacrilatos:** São líquidos monocomponentes que se utilizam sem solventes e que têm uma cura instantânea à temperatura ambiente. Apresentam excelente resistência à tracção mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevado.
- **Acrílicos modificados e metacrilatos:** A modificação faz-se com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Apresentam elevada resistência à

humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Como desvantagens citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e a sua elevada inflamabilidade.

**Adesivos de Poliuretano:** Os adesivos de poliuretano resultam da reacção de um poliol (poliéster-poliol) com um isocianato e outros aditivos(22). A sua estrutura molecular pode variar desde polímeros rígidos reticulados até elastoméricos de cadeia linear e flexível. As cadeias flexíveis são provenientes dos polióis e unidas por segmentos aromáticos rígidos de poliuretano e poliuréia (23). Os adesivos de poliuretano, também conhecidos como cola PVC, foram introduzidos há cerca de 50 anos e apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes cuja cura se processa lentamente à temperatura ambiente. São amplamente utilizados em diferentes tipos de indústrias, tais como: aeroespacial, automóvel, medicina, construção, embalagens, equipamentos, livros, calçado, móveis, têxteis, abrasivos e montagens diversas(8; 23; 24). Têm ductilidade elevada, boa adesão, dureza e resistência química, possuem uma boa flexibilidade, um bom comportamento a baixas temperaturas, uma boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações. As limitações principais incluem a toxicidade do isocianato e a baixa resistência ao corte à temperatura ambiente(23; 24).

**Adesivos de Poliimida:** Os adesivos de poliimida apresentam à temperatura ambiente uma resistência ao corte e à tracção relativamente baixas, da ordem da dos adesivos de poliuretano. A sua utilização apresenta um grande interesse para temperaturas de serviço superiores a 150°C, em virtude de estes adesivos conservarem as suas propriedades sem grandes alterações até uma temperatura máxima de utilização da ordem dos 300°C. Apresentam uma grande dureza, uma certa fragilidade e resistem mal a vibrações. A aplicação destes adesivos é bastante complexa, e estes requerem longos tempos de cura com vários patamares de pressão e de temperaturas, sendo necessário utilizar temperaturas da ordem dos 200 a 400°C(21; 25).

**Adesivos de epóxido:** Os adesivos de epóxido ocupam um lugar de destaque na tecnologia das ligações adesivas, devido às suas óptimas propriedades mecânicas. Podem ser usados na ligação de quase todos os materiais utilizados na indústria. Para além das resinas epoxidadas, entram na sua composição uma grande variedade de agentes de cura e de modificadores, existindo hoje uma grande variedade destes adesivos. Este desenvolvimento de muitos e diversificados sistemas de adesivos de base epóxido foi fruto

da grande evolução que existiu na tecnologia dos adesivos (8; 21; 22). Com a possibilidade de modificar as propriedades dos adesivos epóxicos mediante a adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólicas, etc.) ou de elastômeros (poliuretano, nitrilo, silicone, etc.) em função da resina ou do elastômero de adição, podemos considerar as seguintes famílias (8; 21; 25):

- **Epóxido-Fenólico:** Neste adesivo a fase fenólica garante uma grande estabilidade e resistência ao corte a temperaturas elevadas, da ordem dos 200°C. No entanto, a resistência ao arrancamento e à clivagem é inferior à dos outros adesivos epóxicos.
- **Epóxido-Polisulfido:** Este adesivo apresenta uma grande versatilidade e é especialmente recomendado para a ligação de materiais com diferentes dilatações térmicas. Oferece boa resistência química, bom comportamento na exposição a intempéries, e é adequado para aplicações sujeitas a vibrações e choques.
- **Epóxido-Poliamida:** Neste adesivo a resina poliamida utilizada desempenha a função de agente endurecedor e de flexibilizante, conferindo ao adesivo a propriedade de ser mais flexível quanto maior for a razão entre a quantidade de resina poliamida e resina epóxida. Dentro deste grupo, temos adesivos que utilizam na sua formulação uma poliamida solúvel, conhecidos comercialmente por adesivos “**epóxido-nylon**”. Foram concebidos para satisfazer as necessidades da indústria aeronáutica que necessitava de adesivos com boa resistência ao arrancamento. Possuem boas características a baixas temperaturas, da ordem dos -70°C. O principal inconveniente poderá ser a sua baixa resistência à água e ao álcool.
- **Epóxido-Nitrilo:** Este tipo de adesivo foi desenvolvido na década de 60, sendo constituído por uma resina epóxida modificada por um polímero de nitrilo butadieno. São adesivos com uma boa resistência ao arrancamento, permitindo temperaturas de utilização entre os -55°C e 120°C, encontrando uma grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jacto.
- **Epóxido-Poliuretano:** É um adesivo desenvolvido com a finalidade de ter uma resistência ao arrancamento idêntica à dos adesivos epóxido-poliamida, e uma boa resistência ao choque e vibrações.

### 2.3 Ensaios para a determinação da tenacidade à fractura

A tenacidade à fractura de um material caracteriza a sua resistência ao crescimento de uma fenda, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver até ao momento da rotura. Com a tenacidade à fractura podemos determinar a tensão crítica de fractura, para um dado material, na presença de um dado defeito; determinar o defeito crítico suportado por um dado material, suportando um determinado carregamento, ou ainda determinar qual o factor de intensidade de tensões máximo que um material pode suportar(26).

A teoria básica na qual se fundamenta a Mecânica da Fractura Linear Elástica tem origem no trabalho de Griffith (27). Griffith reconheceu que para uma fenda crescer sob a acção de uma tensão aplicada externamente, é necessário que a diminuição da energia elástica do sistema seja igual ou menor à energia necessária para separar as superfícies da fenda, à medida que a fenda aumenta. Griffith utilizou a análise de tensões de Inglis para o caso de uma placa de dimensões infinitas contendo uma fenda elíptica e chegou às seguintes equações.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi b}} \quad \text{Estado Plano de Tensão} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi b(1 - \nu^2)}} \quad \text{Estado Plano de Deformação} \quad (2.2)$$

Em que:  $E$  - Módulo de Young,  $\nu$ - Coeficiente de Poisson,  $\gamma$  -Energia de superfície do material,  $b$  - Semi comprimento da fenda.

Orowan(28) e Irwin(29) independentemente verificaram que, para metais dúcteis, a energia de fractura é maior que a energia de superfície, pela ocorrência de deformação plástica durante o processo de fractura, desde que a extensão da zona deformada plasticamente seja muito pequena em relação à fenda. Assim modificaram as equações (2.1) e (2.2) de Griffith para ter em conta a deformação plástica.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2EW_f}{\pi b}} \quad \text{Estado Plano de Tensão} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2EW_f}{\pi b(1 - \nu^2)}} \quad \text{Estado Plano de Deformação} \quad (2.4)$$

Em que  $W_f$  é a energia de fractura, tendo em conta a energia elástica e a energia de deformação plástica associadas ao processo de fractura (30). Westergaard(31) realizou a análise e a determinação dos estados de tensão e a deformação na vizinhança da extremidade de uma fenda de comprimento  $2b$  existente numa placa infinita solicitada pela tensão  $\sigma$ . Irwin(32), baseado nos princípios de Westergaard, encontrou soluções para geometrias diferentes e de maior interesse prático, e define o conceito de taxa de libertação de energia crítica,  $G$ , energia necessária para a propagação da fissura de um incremento  $da$ .

$$G = \frac{\pi\sigma^2b}{E} \quad \text{Estado Plano de Tensão} \quad (2.5)$$

$$G = \frac{\pi(1 - \nu^2)\sigma^2b}{E} \quad \text{Estado Plano de Deformação} \quad (2.6)$$

O parâmetro  $\sigma^2b\pi$  é de grande importância, pois a raiz quadrada de  $\sigma^2b\pi$  multiplicado por um factor  $Y$  dependente da geometria da fenda dá-nos o factor intensidade de tensão à fractura ( $K$ ).

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi b} \quad (2.7)$$

Em que  $Y$  é um factor adimensional que depende da geometria e distribuição de carga,  $\sigma$  a tensão remota aplicada na direcção perpendicular à direcção da fenda e  $a$  o comprimento de fenda. Quando a tensão atinge o seu valor crítico,  $\sigma_u$ , obtém-se a Tenacidade à Fractura.

$$K_C = \sigma_u\sqrt{\pi b} \quad (2.8)$$

Substituindo a equação (2.7) nas equações (2.5) e (2.6) temos as equações que relacionam a *Taxa de Libertação de Energia* e o *Factor Intensidade de Tensão*(33).

$$G = \frac{K^2}{E} \quad \text{Estado Plano de Tensão} \quad (2.9)$$

$$G = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad \text{Estado Plano de Deformação} \quad (2.10)$$

Estas expressões são também válidas para os respectivos valores críticos. As diferentes configurações de carregamento na ponta da fenda conduzem a diferentes modos de deslocamento. Estes modos são caracterizados em função das tensões aplicadas e dos consequentes deslocamentos observados na extremidade da fenda. Há três modos principais de sollicitação das fendas, conforme mostrado na **figura 17**(26).

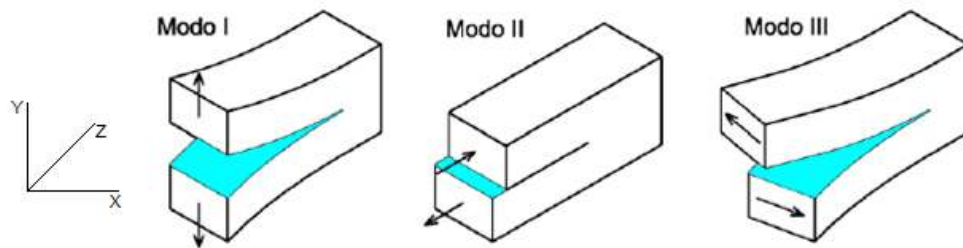


Figura17: Modos principais de sollicitação das fendas (26).

A sollicitação na ponta da fenda de uma estrutura ocorre normalmente em combinação entre os modos principais. **Afigura 18** mostra as várias combinações entre os modos principais de carregamento.

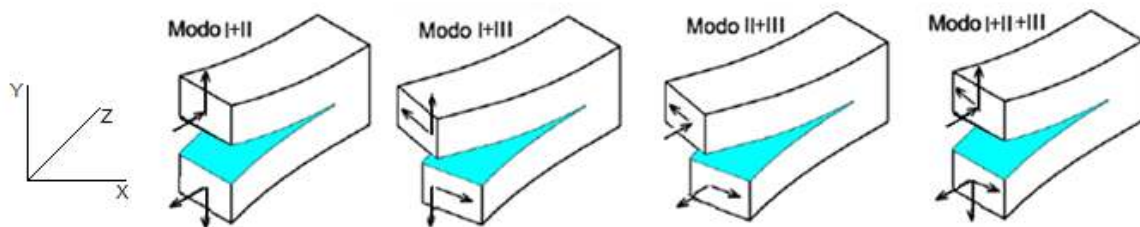


Figura18: Combinação entre os modos principais de carregamento.

### 2.3.1 Modo I

O modo I corresponde ao movimento de abertura da fenda na direcção perpendicular ao seu plano, por efeito das tensões de tracção nessa direcção. É o modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda. O ensaio DCB ilustrado na **figura 19**, é, hoje em dia, universalmente aceite para caracterização da fractura em modo I(34).

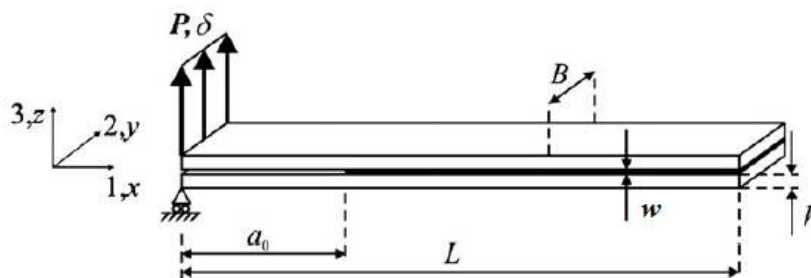


Figura 19: Representação esquemática com solicitação aplicada do provete DCB (34).

Os provetes DCB são constituídos por dois braços de igual comprimento  $L$ , espessura constante  $h$  e largura  $B$ . No caso de juntas adesivas, o adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura  $w$ , sendo considerado o comprimento de fenda inicial  $a_0$  desde a zona onde é aplicada a solicitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo. O ensaio consiste em solicitar os braços do provete em abertura a uma velocidade constante. Durante o ensaio é registada a carga  $P$  e o deslocamento  $\delta$  sendo também medido o comprimento de fenda  $a$  em intervalos de tempo pré-estabelecidos (34).

### 2.3.2 Modo II

Este é o modo deslizante devido ao corte, onde as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra no sentido perpendicular à frente da fenda. Para o modo II não existe, até ao momento, qualquer norma para a caracterização à fractura de juntas adesivas. A maior parte dos artigos publicados baseiam-se em ensaios geralmente utilizados para a caracterização da fractura interlaminar de modo II em materiais compósitos (35). Há vários tipos de ensaios para determinar o  $G_{IIc}$ . Os três tipos de ensaios mais difundidos são o *End Notched Flexure* (ENF), *End Loaded Split* (ELS) e *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF), representados na **figura 20**.

O ensaio ENF, desenvolvido para caracterização da fractura da madeira, tem-se apresentado como o mais adequado para caracterizar a fractura em Modo II de juntas coladas devido à sua simplicidade (36). Na realização do ensaio, o provete com espessura constante é simplesmente apoiado nas suas extremidades e submetido a uma carga aplicada a meio vão e a velocidade constante, originando a propagação da fenda. Durante o ensaio é registada a carga  $P$  e o comprimento da fenda  $a$  em intervalos de tempo constantes. A



propagação instável da fenda é uma desvantagem. Para que a propagação da fenda seja estável o ensaio ENF requerer que exista a relação  $a_0/L > 0,7$  (37). O ensaio ELS tem a vantagem relativamente ao ensaio ENF de promover uma propagação estável da fenda quando  $a_0 / L > 0,55$ (38). No entanto, ambos os ensaios apresentam a dificuldade na medição do comprimento de  $a$ (36).

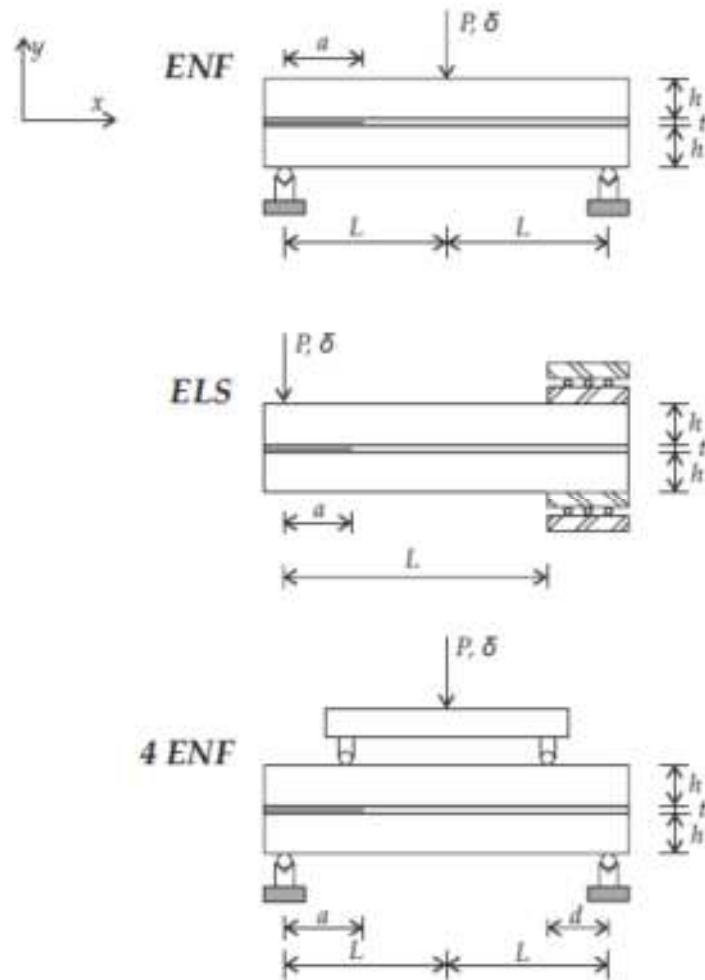


Figura 20: Configurações possíveis de ensaio para Modo II (35).

Em 1999, Martin e Davidson(39) propuseram uma configuração alternativa para o Modo II designada por 4ENF, cujo objectivo é combinar a simplicidade do ensaio ENF com a propagação estável da fenda do ensaio ELS.

### 2.3.3 Modo misto I + II

Para materiais monolíticos, a fenda tende a propagar-se em Modo I, independentemente da orientação da fenda original, fazendo com que este seja o principal modo de sollicitação (40). Contudo, numa junta colada é preciso ter em atenção o papel dos substratos, que vão restringir a propagação da fenda em Modo I puro, forçando a fenda a propagar-se sob Modo Misto I+II (35). Assim, é fundamental usar critérios energéticos adequados, que geralmente aparecem na seguinte forma (41).

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^B = 1 \quad (2.11)$$

$G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são as energias críticas de fractura para os modos puros, e  $A$  e  $B$  são expoentes. O Critério linear ( $A=B=1$ ) e o quadrático ( $A=B=2$ ) são os mais usados. Para se poder caracterizar a fractura em Modo Misto (I+II), torna-se necessário definir o grau de rácio de modos, muito útil para caracterizar a fractura em problemas planos, sendo dado por (41):

$$\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{K_{II}}{K_I} \right] = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} \quad (2.12)$$

No Modo Misto I+II as juntas adesivas estão submetidas ao efeito combinado de tensões normais e de corte. Assim sendo, o teste deve contemplar o efeito da combinação dos modos de sollicitação I e II.

Existem diversos ensaios para a caracterização do comportamento de juntas adesivas em modo misto (**figura 21**), dos quais se destacaram (26):

**Crack Lap Shear (CLS)** (42); o CLS consiste num provete constituído por dois braços com comprimentos diferentes sollicitado à tracção. As cargas aplicadas a cada um dos braços do provete produzem em ambos corte (Modo II) e abertura (Modo I), ao longo da interface entre o braço superior e inferior(43). Dispositivo de ensaio simples, com deslocamento pequeno na abertura da fenda e relação de modos constante. Os valores relativos de  $G_I$  e  $G_{II}$  podem ser ajustados através da variação da espessura dos braços inferior e superior (26).

**Mixed Mode Bending (MMB)** (44) (45); o ensaio MMB é uma combinação dos ensaios para caracterização das juntas em modo I e II, o DCB e o ENF respectivamente. Este é o ensaio mais popular para determinar a tenacidade à fractura interlaminar de materiais compósitos monolíticos. Recentemente tornou-se o método de ensaio padrão, normalizado pela ASTM D6671-01 (46).

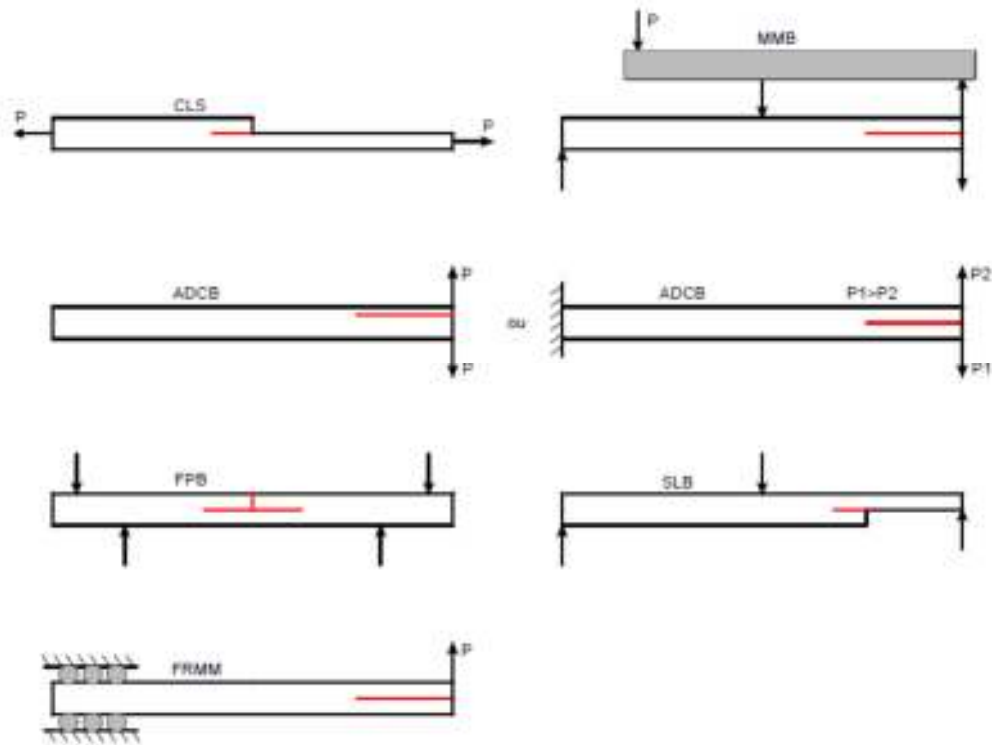


Figura21: Configurações de ensaios para Modo Misto I+II(26).

**Asymmetric Double Cantilever Beam(ADCB)** (47);o ADCB é uma generalização do ensaio DCB para caracterização de materiais em modo misto, em que os braços do provete são fabricados em materiais diferentes e / ou de diferentes espessuras. Este ensaio é adequado para avaliar em modo misto I+II, a tenacidade de materiais compósitos, bem como a resistência à fractura de juntas adesivas(48).

**Four Point Bend(FPB)** (49) analisou a fissuração na interface entre dois materiais com propriedades mecânicas diferentes utilizando o ensaio FPB. O provete é solicitado à flexão em quatro pontos. O FPB é um dispositivo de ensaio simples, a relação de modos varia com o comprimento da fenda e a geometria do provete é diferente para cada relação de modos (26).

**Single LegBend (SLB)** (50); o SLB utiliza um provete modificado do ensaio ENF. O ensaio SLB é realizado num dispositivo de três pontos de flexão, em que o braço inferior do provete tem menor comprimento. O provete apoia numa das extremidades no braço superior, sendo carregado no ponto médio entre os dois apoios(51).

**Fixed Ratio Mixed Mode (FRMM)** (52)); no ensaio FRMM é aplicada uma única força ascendente no braço superior do provete fornecendo uma relação fixa de Modo Misto. O dispositivo de ensaio não é simples, pelo que é inegável a preferência pelo ensaio MMB desenvolvido por Crews e Reeder 1988 (44), ver **figura 22**, que permite obter facilmente uma larga gama de combinações de modos alterando o comprimento do braço  $c$ , obtendo-se diferentes relações de Modos I e II.

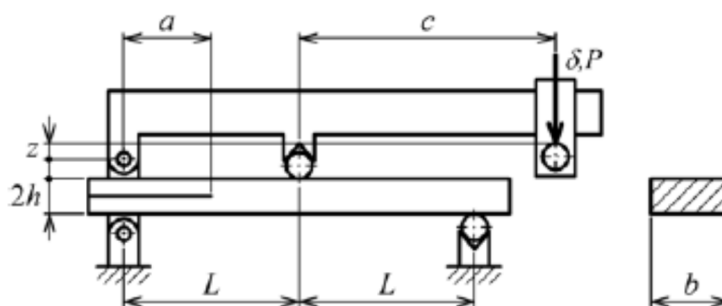


Figura22:Configuração esquemática do ensaio MMB.

O ensaio FRMM pode ser visto como uma combinação do ensaio DCB e do ENF (26), (**figura 23**).

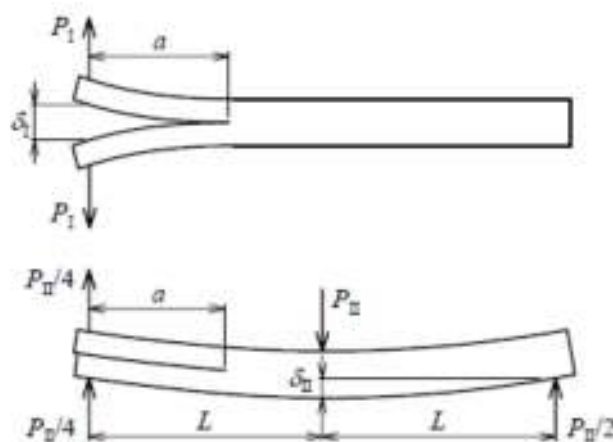


Figura23: Decomposição do ensaio MMB nos ensaios DCB e ENF.

## 2.4 Métodos para a determinação do $G_{Ic}$

Em Modo I, o ensaio mais utilizado é o DCB (figura 24), que está actualmente normalizado para a medição de  $G_{Ic}$  em juntas coladas pela norma ASTM D3433-99(53). O provete é constituído por dois braços de igual comprimento e de espessura constante. Deverá ser providenciado um sistema de fixação à máquina de modo a garantir o correcto alinhamento da sollicitação. A velocidade de sollicitação está geralmente compreendida entre 0,5 a 3 mm/min, dependendo da geometria e das características dos materiais do provete utilizado.

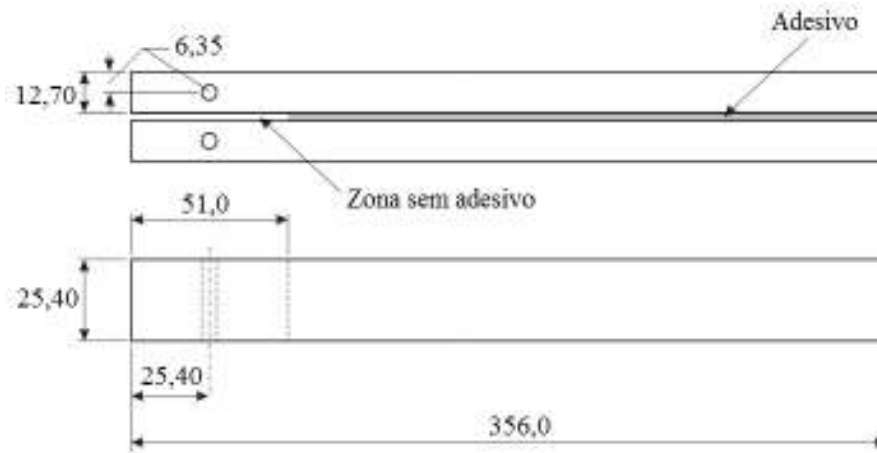


Figura24: Geometria do provete DCB adoptado pela norma ASTM D3433-99(dimensões em mm).

No caso de substratos metálicos uniformes e simétricos, para que não ocorra a sua plastificação durante o ensaio e para que os resultados não sejam influenciados, a norma **ASTM D3433-99** define que a espessura mínima  $h$  é dada pela equação (2.13):

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{BF_{ty}}} \quad (2.13)$$

Sendo:  $h$  - Espessura do provete normal ao plano de colagem em mm,  $F_{ty}$  - Tensão de cedência à tracção do metal do provete em MPa,  $T$  - Carga máxima de início da propagação da fenda majorada em 150% em N,  $a$  - Comprimento da fenda correspondente ao esforço máximo em mm e  $B$  - Largura do provete em mm.

A norma **ASTM D3433-99** apresenta uma outra geometria de provete para determinar  $G_{Ic}$ .

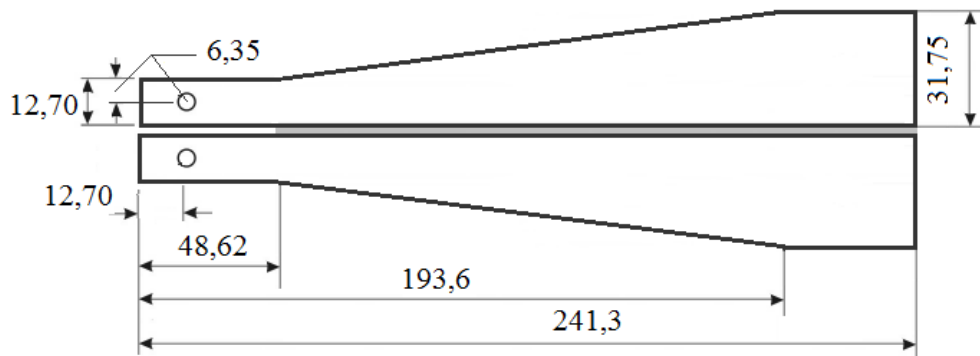


Figura 25: Geometria do ensaio CDCB adoptado pela norma ASTM D3433-99.

Também é um provete simétrico, em que os braços têm a forma típica de cunha, e é designado por **Contoured Double Cantilever Beam (CDCB)**, conforme **figura 25**. A vantagem deste tipo de ensaio está relacionada com o facto de se poder obter a taxa crítica de libertação de energia  $G_{Ic}$  independentemente do comprimento de fenda  $a$ .

#### 2.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Existem vários métodos para determinar o valor de  $G_{Ic}$  que necessitam da medição do comprimento da fenda durante a sua propagação, dos quais se destacam o CCM e o CBT. A dificuldade na monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio, e a não consideração da energia dissipada na Zona de Processo de Fractura (ZPF), são algumas desvantagens. Para ultrapassar tais desvantagens, de Moura et al. (34) propuseram o método CBBM, baseado no conceito de fenda equivalente.

##### 2.4.1.1 Compliance Calibration Method

As grandezas básicas, medidas no decorrer do ensaio DCB, são a força  $P$  e o comprimento de fenda  $a$ , além do deslocamento relativo  $\delta$  dos pontos de aplicação da força. A partir dessas grandezas, pelo CCM determina-se a taxa crítica de libertação de energia, recorrendo à equação de Irwin-Kies (34).

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.14)$$

onde  $B$  é a largura do provete e  $C$  a sua flexibilidade, sendo a flexibilidade dada pela relação  $C = \frac{\delta}{P}$ . Como em diversas juntas coladas, dependendo do adesivo, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, e esta dificuldade pode introduzir erros não desprezíveis na derivada da flexibilidade relativamente ao comprimento da fenda  $\left(\frac{dC}{da}\right)$ . Para ajustar a curva de  $C = f(a)$ , utilizou-se o polinómio cúbico ( $C = C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$ ) que conduz a

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1). \quad (2.15)$$

#### 2.4.1.2 Corrected Beam Theory

A taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I ( $G_{Ic}$ ) pelo CBT é obtida recorrendo à Teoria das Vigas Corrigidas (34), segundo a qual, na ausência de grandes deslocamentos e sem utilizar blocos para aplicação de carga se obtém

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (2.16)$$

onde  $\Delta$  é uma correcção para rotação e deslocamento do aderente junto à frente da fenda. Pela teoria das vigas, a relação de flexibilidade e o comprimento da fenda é expressa por:

$$C = \frac{8(a + |\Delta|)^3}{E_1 B h^3} \quad (2.17)$$

que dá

$$C^{\frac{1}{3}} = \frac{2}{h(E_1 B)^{\frac{1}{3}}} (a + |\Delta|) \quad (2.18)$$

A correlação  $\Delta$  é determinada através de uma regressão linear dos valores experimentais de  $C^{1/3}$  em função de  $a$ .

## 2.4.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente

Como se observou, os métodos CCM e o CBT para a determinação da energia de fractura requerem a medição precisa de  $a$  durante a realização do ensaio, o que constitui uma tarefa difícil de realizar dada a dificuldade em identificar o início da fenda e a sua posição ao longo do ensaio. Quando são utilizados adesivos dúcteis, deve ainda ser considerada a energia dissipada da ZPF em consequência de múltiplas micro-fissuras desenvolvidas na espessura do adesivo e da plastificação. De forma a ultrapassar tais dificuldades, utiliza-se o CBBM baseado no conceito de fenda equivalente que inclui os efeitos da ZPF sobre a energia de fractura, recorrendo apenas aos dados da curva força-deslocamento ( $P$ - $\delta$ ), que não necessita da medição do comprimento real da fenda durante a propagação. Este método depende apenas da flexibilidade  $C = \delta/P$  do provete durante a propagação da fenda e é descrito de seguida.

### 2.4.2.1 Compliance-Based Beam Method

Para a solicitação de Modo I, a energia de deformação  $U$ , devido aos efeitos de flexão e de corte, é dada pela expressão (34):

$$U = 2 \left[ \int_0^a \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^a \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx \right] \quad (2.19)$$

Sendo  $M_f$  o momento flector,  $E$  e  $G_{13}$  as propriedades elásticas do material, módulo de elasticidade (Young) e módulo de corte respectivamente,  $B$  a largura do provete,  $I$  o momento estático de 2ª ordem da secção recta de cada substrato e  $\tau$  a tensão de corte ao longo da espessura de cada braço do provete, dada pela expressão

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{V}{Bh} \left( 1 - \frac{z^2}{c^2} \right) \quad (2.20)$$

onde  $c$  é igual a metade da espessura do substrato ( $c = h/2$ ), e  $V$  o esforço transversal em cada braço do provete ( $0 \leq x \leq a$ ). Através do teorema de Castigliano os deslocamentos  $\delta$  podem ser escritos como:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{EBh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}} \quad (2.21)$$



Esta equação constitui uma aproximação baseada na Teoria de Viga de Timoshenko, permitindo assim relacionar a flexibilidade  $C = \delta/P$  do provete com a evolução de  $a$  ao longo do ensaio. A teoria das vigas simples não contabiliza a influência da concentração de tensões e a rotação dos substratos na extremidade da fenda. A obtenção da equação (2.21) pressupõe que os substratos são vigas encastradas na extremidade da fenda, o que na realidade não se verifica, assim como a presença do adesivo. Para ultrapassar o efeito dos referidos factores, Moura et al. (34) propuseram a definição de um módulo de flexão equivalente  $E_f$  em vez do uso de  $E$ , módulo esse que incorpora todos os fenómenos acima mencionados e que é definido a partir da equação (2.22) recorrendo às condições iniciais ( $a_0$  e  $c_0$ )

$$E_f = \left( C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3} \quad (2.22)$$

Sendo  $\Delta$  um factor de correcção de rotação ao comprimento de fenda inicial  $a_0$ , utilizado na equação (2.16). Este parâmetro pode ser determinado experimentalmente ou numericamente, bastando para isso carregar o provete com diferentes comprimentos de fenda inicial, para se obter assim, para cada valor de  $a_0$ , o correspondente valor de flexibilidade  $C$ . Este procedimento permite definir uma regressão linear  $C^{1/3} = f(a_0)$  com os pontos obtidos (figura 26).

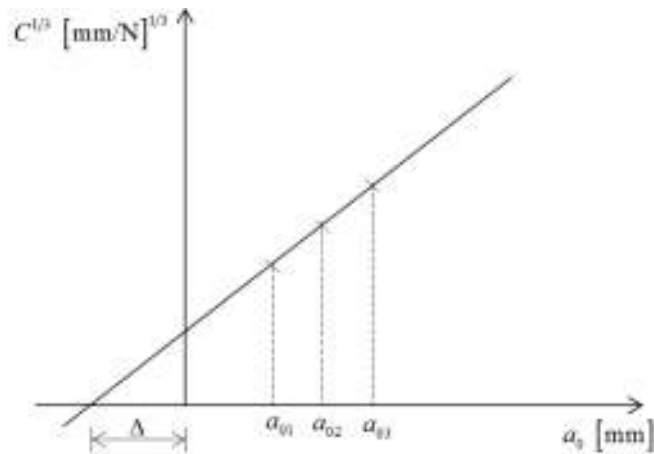


Figura 26: Representação esquemática da obtenção do factor de correlação do comprimento de fenda inicial(54).

Por outro lado, deve ser considerado um comprimento de fenda equivalente  $a_{eq}$  durante a propagação da fenda, para incluir os efeitos da ZPF na extremidade da fenda (figura 27).

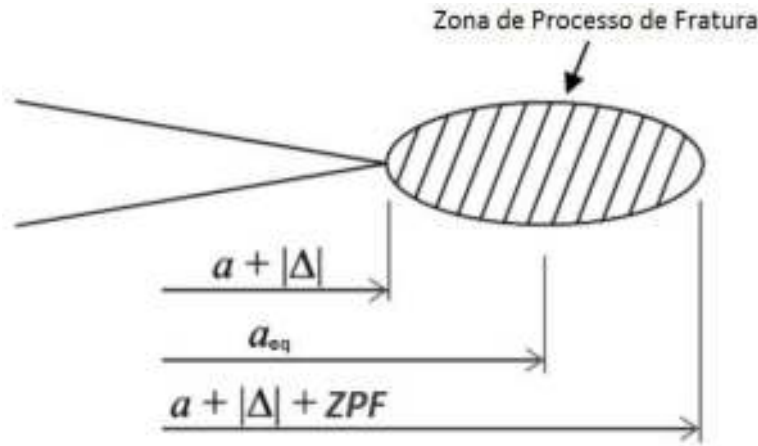


Figura27: Representação esquemática da ZPF e do conceito de comprimento de fenda equivalente(34).

O comprimento de fenda equivalente pode ser calculado através da equação (2.21), considerando  $a_{eq}$  em vez de  $a$ , como função do valor da flexibilidade  $C$  do provete, registada durante o ensaio, sendo  $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta a_{ZPF}$ . A solução da equação cúbica pode ser obtida recorrendo ao software Matlab<sup>®</sup>. O  $G_{Ic}$  pode ser assim obtido a partir da equação (2.14) de Irwin-Kies, o que origina

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2h} \left( \frac{2a_{eq}^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (2.23)$$

### 2.4.3 Método baseado no integral- $J$

Como consequência das dificuldades matemáticas surgidas na caracterização da zona deformada em torno da extremidade duma fenda, e como não se conseguia formular um parâmetro que definisse completamente esta situação, Rice em 1968 (55) para investigação da propagação de fendas em materiais dúcteis introduziu o chamado integral- $J$ . O integral- $J$  é um integral de linha em torno da ponta da fenda, invariante para qualquer percurso utilizado desde que se inicie na face inferior e termine na face superior da fenda, conforme ilustrado na **figura 28**.

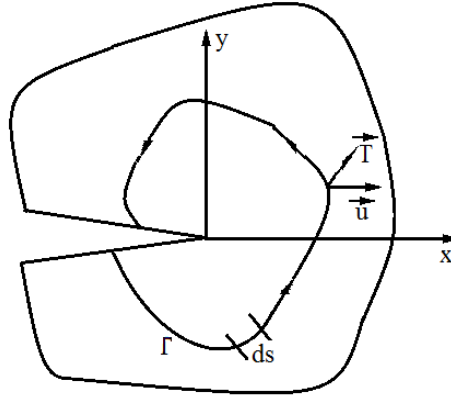


Figura28:Contorno arbitrário em torno da ponta da fenda.

Usando o princípio de conservação de energia, Rice(55) demonstrou que o integral- $J$  se define pela seguinte expressão:

$$J = \int_{\Gamma} \left[ W dy - T \frac{du}{dx} ds \right] \quad (2.24)$$

onde  $W$  é a densidade da energia de deformação,  $T$  é o vector de tracção normal, actuando no sentido exterior ao contorno,  $u$  é o vector de deslocamento,  $ds$  incremento de comprimento ao longo do contorno e  $\Gamma$  o contorno escolhido em torno da ponta da fenda, com inicio na face inferior e fim na face superior da fenda.

Stigh et al. (56), em trabalho realizado baseando no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, reflectindo as propriedades do adesivo, podendo o integral- $J$  ser calculado ao longo dum caminho arbitrário que contorna a fenda. Campilho et al. (57), em trabalho realizado com base na equação (2.24) definida por Rice (55), chegaram à equação (2.25) para determinar o valor de  $G_{Ic}$ , que permite obter a expressão da lei coesiva:

$$G_I = \int_0^{\delta_{Ic}} \sigma_I(\delta_I) d\delta_I \quad ; \quad \sigma_I(\delta_I) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_I} \quad (2.25)$$

Sendo  $\delta_I$  e  $\delta_{Ic}$  a abertura da fenda actual e de rotura, respectivamente, medidas em  $a_0$ , e  $t_I$  a tensão normal de tracção aplicada. Para o ensaio de DCB, aplicado o conceito do balanço

energético e da teoria das vigas para determinar a taxa de libertação de energia em Modo I,  $G_I$ , tem-se:

$$G_I = 12 \frac{(Pa)^2}{Eh^3} + P\theta_0 \text{ ou } G_I = P\theta_P \quad (2.26)$$

Sendo  $Pa$  carga aplicada por unidade de largura nas extremidades do aderente,  $a$  o comprimento da fenda,  $E$  o módulo de Elasticidade (Young) dos aderentes,  $h$  a altura do aderente,  $\theta_0$  a rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda e  $\theta_P$  a rotação relativa dos aderentes na linha de carga. Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de  $P$ ,  $a$ ,  $\delta_I$  e  $\theta_0$ . Para efeitos de cálculo de  $G_{Ic}$ , considera-se o valor de patamar da curva  $G_I$ - $\delta_I$ .

#### 2.4.3.1 Determinação dos parâmetros por sensores mecânicos

Para a determinação dos parâmetros  $P$  (carga),  $\delta$  (deslocamento do apoio do provete) e  $t$  (tempo) para um determinado ensaio DCB, a máquina de ensaio encontra-se em comunicação com um computador de aquisição de dados, onde os mesmos são registados. Com o registo dos valores de carga e deslocamento, obtemos assim as curvas  $P$ - $\delta$ . O deslocamento do adesivo na extremidade da fenda,  $\delta_I$ , é medido por um sensor de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). O ângulo de rotação  $\theta_0$  dos aderentes pode ser medido mediante um codificador de eixo ou com dois sensores de inclinação (58).

Ambos os tipos de sensores têm alta precisão e resolução. A medição em tempo real do comprimento da fenda é realizada com o apoio de microscópicos ópticos.

#### 2.4.3.2 Determinação dos parâmetros por métodos ópticos

A evolução nos últimos anos de técnicas de análise de imagem com recurso à computação permitiu o acesso a técnicas de medição dos campos cinemáticos (campo dos deslocamentos e das deformações) por análise de imagem através da Correlação Digital de Imagem (CDI). Desenvolvimentos específicos têm sido propostos para analisar a propagação da fenda(59). Para a determinação dos parâmetros  $\delta_I$ ,  $a$  e  $\theta_0$  por CDI, é necessário que durante a realização do ensaio seja fotografada a zona de propagação da

fenda com uma câmara digital com intervalos constantes de tempo (5 em 5 segundos). As imagens devem ter uma boa resolução que permita o seu tratamento através da CDI (a resolução da imagem deve conduzir a cerca de 4 pixels por milímetro). A análise das imagens tiradas durante o teste é realizada por um software através de algoritmos de processamento da imagem baseado na comparação do padrão(60). A fenda cresce da esquerda para a direita no sentido horizontal como um caminho escuro e fino numa área pintada de branco, sendo a fenda visível como uma variação de intensidade, ficando uma imagem binária. A imagem é discretizada numa malha de unidades individuais quadrangulares, parcialmente sobreponíveis.

O algoritmo de correlação compara a imagem actual (deformada) com a imagem padrão (não deformada). As linhas verticais são automaticamente procuradas através da imagem binária da direita para a esquerda, a fim de encontrar a primeira intercepção desta linha com a ponta da fenda.



## 3 Desenvolvimento

Neste capítulo são descritos os detalhes experimentais, nomeadamente os materiais, o método de produção dos provetes, bem como os ensaios e respectivo procedimento para obtenção de  $G_{Ic}$  pelos vários métodos, incluindo o método óptico. Toda esta componente foi realizada nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Posteriormente, é feito o tratamento dos dados com vista à obtenção de  $G_{Ic}$ , comparando os diferentes métodos de obtenção de  $G_{Ic}$  no que diz respeito às potencialidades e limitações dos mesmos. Finalmente, é feita uma comparação dos três adesivos.

### 3.1 Adesivos testados

Os adesivos utilizados nos ensaios já foram testados em trabalhos anteriores relativamente às propriedades mecânicas mais relevantes, que serão indicadas em tabelas para caracterização genérica de cada um dos adesivos.

#### 3.1.1 SikaForce® 7888

O SikaForce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano fornecido pelo fabricante SIKA, composto por dois componentes (Componente A resina 7888 L10 A, componente B endurecedor 7888 B). A temperatura óptima de aplicação é entre 15 e 30°C, feita com uma pistola pneumática de deposição que força a circulação dos componentes em iguais quantidades através de um bico que promove a sua mistura. Após a deposição, o adesivo inicia o processo de cura por reacção química dos dois componentes. Possui um tempo de manuseamento, após mistura dos seus componentes, de aproximadamente 10 minutos a uma temperatura de 25°C. Como já referido, o processo de cura é por reacção química entre os dois componentes, e o tempo de cura diminui à medida que a temperatura de cura

aumenta. Na **figura 29** podemos observar um dos formatos comercial, respectivo bico de mistura da resina e endurecedor e a pistola de aplicação.



Figura 29: Formato comercial do adesivo SikaForce® 7888 e pistola de aplicação.

Na **tabela 1** encontram-se algumas das suas propriedades mecânicas obtidas em trabalhos realizados anteriormente (61).

Tabela 1 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo SikaForce® 7888 (61).

Módulo de Young $E$ (GPa)	$1,89 \pm 0,81$
Tensão de cedência à tracção $\sigma_y$ (MPa)	$13,20 \pm 4,83$
Tensão de rotura à tracção $\sigma_F$ (MPa)	$28,60 \pm 2,0$
Deformação de rotura à tracção $\varepsilon_F$ (%)	$43,0 \pm 0,6$
Energia crítica modo I $G_{Ic}$ (N/mm)	$0,723 \pm 0,075$
Energia crítica modo II $G_{IIc}$ (N/mm)	$8,72 \pm 1,22$

### 3.1.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é um adesivo estrutural de base epóxico, fornecido pelo fabricante americano HUNTSMAN, composto por dois componentes (componente A resina, componente B endurecedor). Com um comportamento dúctil e de alta resistência, apresenta uma boa resistência à clivagem. É bastante utilizado na ligação de substratos metálicos e compósitos. A sua aplicação é feita com uma pistola manual de deposição que força a circulação dos componentes em iguais quantidades através de um bico que promove a sua mistura, após a qual o adesivo inicia o processo de cura. Possui um tempo de manuseamento, após mistura dos seus componentes, de 30 a 40 minutos a uma temperatura de 25°C e um tempo de cura, para alcançar 10 MPa de resistência ao corte, de



6 horas a 23°C ou 35 minutos a 60°C, segundo informação da ficha técnica do adesivo. Na **figura 30** podemos observar um dos formatos comerciais(500 ml), bico de mistura da resina e endurecedor e a respectiva pistola de aplicação.



Figura 30: Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml e pistola de aplicação.

Na **tabela 2** encontram-se algumas das suas propriedades mecânicas, obtidas em trabalhos realizados anteriormente (62).

Tabela 2 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® 2015 (62).

Módulo de Young $E$ (GPa)	1,85±0,21
Tensão de cedência à tracção $\sigma_y$ (MPa)	12,63±0,61
Tensão de rotura à tracção $\sigma_f$ (MPa)	21,63±1,61
Deformação de rotura à tracção $\varepsilon_f$ (%)	4,77±0,15
Módulo de corte $G$ (GPa)	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte $\tau_y$ (MPa)	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte $\tau_f$ (MPa)	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte $\gamma_f$ (%)	43,9±3,4
Coeficiente de Poisson $\nu^*$	0,33

\* dados do fabricante

### 3.1.3 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 é um adesivo estrutural de base epóxico fornecido pelo fabricante suíço HUNTSMAN, composto por dois componentes (Resina AV138, endurecedor HV998), com um comportamento frágil. A relação de mistura, em peso, é de 100g de resina AV138 para 40g de endurecedor HV998, com uma precisão de  $\pm 5\%$ .



Figura 31: Formato comercial do adesivo Araldite® AV138.

Na **tabela 3** encontram-se algumas das suas propriedades mecânicas obtidas em trabalhos realizados anteriormente (62).

Tabela 3 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 (62).

Módulo de Young $E$ (GPa)	$4,89 \pm 0,81$
Tensão de cedência à tracção $\sigma_y$ (MPa)	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tracção $\sigma_f$ (MPa)	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de rotura à tracção $\varepsilon_f$ (%)	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de corte $G$ (GPa)	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte $\tau_y$ (MPa)	$25,1 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte $\tau_f$ (MPa)	$30,2 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte $\gamma_f$ (%)	$7,8 \pm 0,7$
Coefficiente de Poisson $\nu^*$	0,35

\* dados do fabricante

A mistura é feita manualmente e deve ser realizada num recipiente limpo (colocar a resina e o endurecedor juntos e mexer durante, no mínimo 3 minutos, para que a mistura fique homogênea). A sua aplicação é feita com uma espátula sobre as superfícies pré tratadas a serem unidas. Possui um tempo de manuseamento, após mistura dos seus componentes de 35 minutos a uma temperatura de 25°C e um tempo de cura para alcançar 13 MPa de resistência ao corte de 24 horas a 23°C ou 15 MPa em 1 hora a 60°C, segundo informações apresentadas na ficha do fabricante. Na **figura 31** podemos observar um dos formatos comercial da resina e do endurecedor.

### 3.2 Substratos utilizados

O material usado para os substratos foi a liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida liga estrutural da série 6000. É amais utilizada para peças fabricadas por maquinagem.

#### 3.2.1 Material

Foi seleccionada a liga de alumínio AW 6082-T651 para o fabrico dos aderentes pela sua elevada resistência à tracção (mínimo de 310 MPa, tal como especificado pelo fabricante), obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C. A **tabela 4** descreve a sua composição química e a **tabela 5** elenca as propriedades mecânicas especificadas pelo fabricante (63).

Tabela 4 – Composição química (%) da liga de alumínio AW 6082-T651 (63).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mínimo	0,7	----	----	0,4	0,6	----	----	----	----
Máximo	1,3	0,50	0,10	1	0,12	0,25	0,20	0,10	Resto

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082 T651 (63).

Espessura máxima [mm]	Tensão ruptura mínima [MPa]	Tensão cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento %	Dureza Brinell	Modulo elasticidade [GPa]
6	310	260	10	95	70

Esta liga foi especificamente escolhida devido à sua ampla utilização na Europa para diversas aplicações estruturais, sob diferentes perfis extrudidos. O alumínio é quase ideal para os adesivos, já que tem elevada energia de superfície e uma boa formabilidade e uma elevada relação resistência/peso. As juntas adesivas de alumínio são normalmente usadas na indústria de aeronaves e automóveis (8).

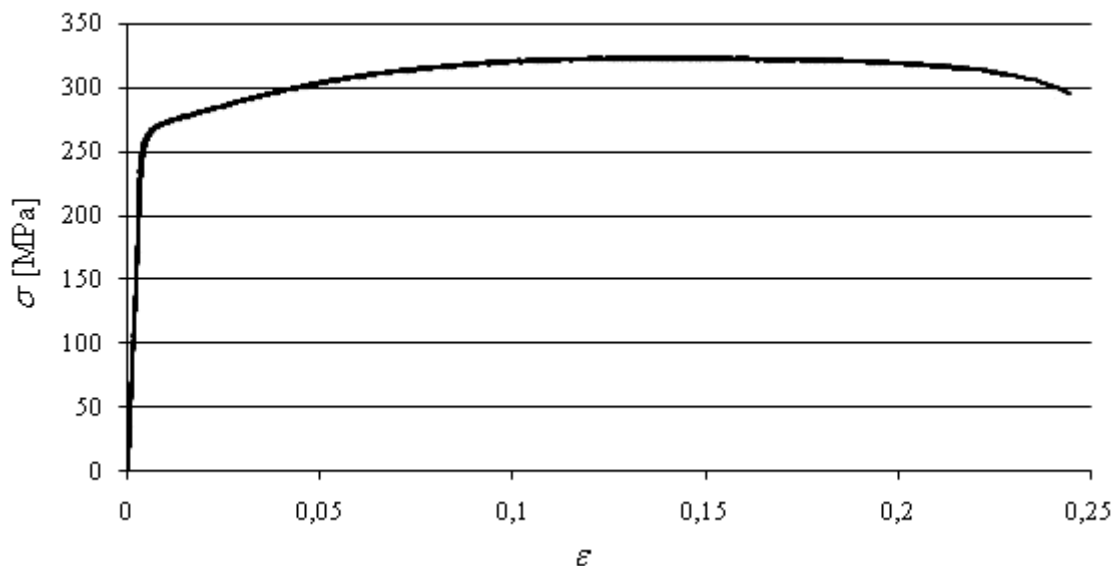


Figura 32: Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651(64).

A **figura 32** representa a curva tensão deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) do alumínio dos substratos obtida na referência (64), obtido de acordo com a norma ASTM-E8M-04(65). O Módulo de Young (E) da liga de alumínio é de  $70,07 \pm 0,83$  GPa, a tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) é de  $261,67 \pm 7,65$ , a tensão de ruptura ( $\sigma_T$ ) é de  $324 \pm 0,16$  MPa e a deformação de ruptura à tracção ( $\epsilon_T$ ) é de  $21,70 \pm 4,24\%$ (64).

### 3.2.2 Fabrico

Os substratos foram fabricados a partir de uma chapa laminada de  $2000 \times 1000 \times 3$  (dimensões em mm) de liga de alumínio AW 6082-T651, que foi cortada em tiras com uma largura de 27 mm, posteriormente cortadas a um comprimento de 143 mm. Esta operação foi realizada pelo fornecedor da chapa (Lanema).

### 3.3 Fabrico dos provetes DCB

Para a realização dos ensaios em modo I foram fabricados 18 provetes DCB, 6 por cada tipo de adesivo.

A **figura 33** mostra a geometria dos provetes e respectivas dimensões.



Figura33:Representação esquemática dos provetes DCB.

A **tabela 4** indica as dimensões do provete DCB.

Tabela 6 – Dimensões teóricas dos provetes DCB (em mm).

Comprimento do provete $L$	143
Largura do provete $B$	27
Espessura do substrato $h$	3
Espessura do adesivo $w$	1
Comprimento da pré-fenda $a_0$	3

Não sendo viável a execução de furos para solicitar os provetes em modo I devido à reduzida espessura dos substratos (3mm), recorre-se a outra abordagem, optando-se por colar com adesivo dobradiças em aço na extremidade não colada dos provetes.

### 3.3.1 Preparação dos substratos

O objectivo da preparação dos substratos é garantir uma boa adesão para garantir que o ponto mais fraco seja o adesivo e assim testar a resistência coesiva de adesivo, ao invés da resistência da sua interface com os substratos. Os substratos, depois de cortados nas dimensões definidas, foram limpos com papel embebido em acetona para garantir o seu desengorduramento. Seguidamente os substratos foram colocados na granalhadora CIDBLAST modelo RT5S, existente no laboratório do ISEP (**figura 34**).



Figura34:Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.

A granalhagem dos substratos foi realizada a seco, utilizando óxido de alumínio, produto abrasivo com alto poder de limpeza, em pó na cor marrom, com grande dureza e elevada tenacidade (**figura 35**).O processo de granalhagem consiste na projecção através dum bico do óxido de alumínio sobre a superfície dos substratos. Para aliviar as tensões e o desempenho dos substratos, estes são granalhados em ambas as faces.



Figura 35:Granalhagem dos substratos a seco.

Após a granalhagem, as superfícies dos substratos apresentavam uma rugosidade uniforme permitindo uma boa adesão do adesivo. As superfícies dos substratos foram limpas dos resíduos de óxido de alumínio com um jacto de ar comprimido. Para garantir uma limpeza perfeita, no final e antes da colagem, todos os substratos foram limpos vigorosamente com papel embebido em acetona, realizando várias passagens(**figura 36**).



Figura 36: Limpeza dos substratos.

### 3.3.2 Colocação de espaçadores calibrados

Para garantir uma espessura constante de adesivo, de 1 mm ao longo de todo o comprimento, assim como a pré-fenda inicial, foram colocados dois espaçadores calibrados, um na extremidade traseira do provete e outro na zona frontal de aplicação do adesivo, conforme representação esquemática na **figura 37**.

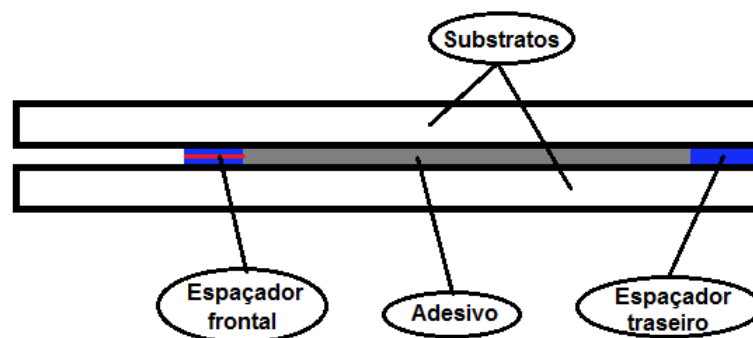


Figura37: Representação esquemática da localização dos espaçadores.

Para o fabrico do espaçador traseiro foi utilizada fita de aço calibrada com 1 mm de espessura e 30 mm de largura. No fabrico do espaçador frontal foi utilizada uma

abordagem diferente, pois o objectivo deste espaçador, além de garantir a espessura do adesivo, é também criar a pré-fendainicial. O método utilizado foi o proposto por Lee et al. (66), e consiste no fabrico de um espaçador com uma lâmina de barbear de 0,1 mm de espessura no interior de duas fitas de aço calibradas com 0,45 mm de espessura. Inicialmente, procede-se ao corte das duas fitas de aço calibrado de 0,45 mm e ao corte da lâmina de barbear em duas metades. Aplica-se cianoacrilato numa face da fita, e cola-se a meia lâmina à fita, deixando o gume da lâmina de fora da fita. Aplica-se novamente cianoacrilato na meia lâmina de barbear e cola-se a outra fita, mantendo também o gume da lâmina de fora de forma a garantir a pré-fenda inicial (**figura 38**).



Figura38:Fabrico do espaçador frontal (lâmina)

Para garantir a remoção dos espaçadores após a colagem, é necessário aplicar um agente desmoldante. Neste trabalho, foi utilizado o desmoldante Loctite® 770-NC.

Antes da aplicação do desmoldante os espaçadores foram limpos com acetona para remover resíduos de gordura provenientes do manuseamento durante o corte das lâminas. Após limpeza e antes de aplicação do desmoldante, os espaçadores são colocados a aquecer num forno eléctrico a 100°C aproximadamente durante 15 minutos (**figura 39**).



Figura 39:Forno com os espaçadores para cura do desmoldante.



Após o estágio de 15 minutos de aquecimento no forno, os espaçadores foram retirados para aplicação em ambas as faces da primeira demão do desmoldante. Estes foram novamente colocados no forno, durante 2 a 3 minutos para cura, e o processo é repetido por mais duas vezes.

Para garantir o correcto posicionamento do espaçador frontal, bem como garantir a localização uniforme da pré-fenda em todos os provetes, realizou-se em todos os substratos uma marcação a 50 mm de uma das extremidades para facilitar e garantir o posicionamento correcto do espaçador da frente. Os espaçadores foram colocados no substrato inferior do provete, conforme **figura 40**.



Figura 40: Substrato inferior com os espaçadores colocados.

### 3.3.3 Colagem e cura dos provetes

Após a colocação dos espaçadores calibrados num dos substratos, os substratos foram colocados em grupo de seis em três régua de madeira, com cada régua destinada a cada tipo de adesivo a ser utilizado, conforme **figura 41**.



Figura 41: Substratos com espaçadores posicionados para aplicação do adesivo.

Com os espaçadores colocados em dezoito dos substratos, teve-se o cuidado de colocar uma folha de Teflon<sup>®</sup> entre os substratos e a régua de madeira para evitar que o excesso de adesivo escorresse e colasse os substratos à madeira. A colagem foi realizada com os três tipos de adesivos mencionados anteriormente, o SikaForce<sup>®</sup> 7888, o Araldite<sup>®</sup> 2015 e o Araldite<sup>®</sup> AV138.

O SikaForce<sup>®</sup> 7888 é um adesivo fornecido em embalagens de bicomponente (600 + 600 ml), e a sua aplicação é feita com recurso a uma pistola accionada por ar comprimido. O Araldite<sup>®</sup> 2015 é também fornecido em embalagens de bicomponente (50 ml), sendo a sua aplicação com uma pistola accionada manualmente. A deposição do adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7888 e do Araldite<sup>®</sup> 2015 foi efectuada sob a forma de linhas paralelas transversais ao provete, conforme mostrado na **figura 42**.

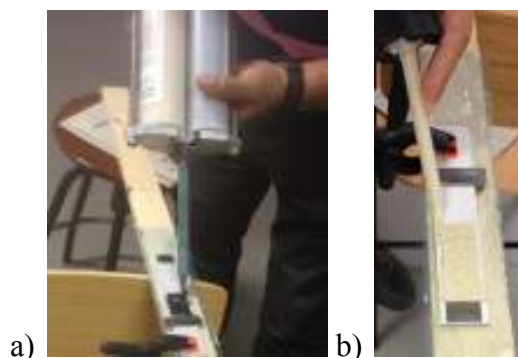


Figura 42: Deposição dos adesivos SikaForce<sup>®</sup> 7888 (a) e Araldite<sup>®</sup> 2015 (b) no substrato inferior.

Em ambos os casos, a aplicação do adesivo foi efectuada de forma a não deixar espaços vazios entre linhas transversais consecutivas, potenciadores de vazios após montagem do substrato superior do provete. O adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é fornecido em duas embalagens (resina e endurecedor) e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes na razão de 100 g de resina para 40g de endurecedor antes da sua mistura com o auxílio de uma balança digital. Com os componentes na proporção correcta no copo de mistura realizou-se a homogeneização destes com uma espátula, conforme **figura 43**.



Figura 43:Pesagem dos componentes e homogeneização da mistura do Araldite® AV138.

Após a homogeneização da mistura, procedeu-se à deposição do adesivo com o auxílio de uma espátula. Independentemente do adesivo, foi depositada quantidade suficiente de adesivo para que este fosse expelido pelas faces laterais do provete aquando da montagem do mesmo, evitando assim falhas na colagem. A aplicação do adesivo junto ao espaçador traseiro foi bastante cuidadosa, tentando evitar o seu desposicionamento e deposição de adesivo do mesmo, já que tal iria conduzir a um aumento não desejado de espessura do adesivo no provete. Junto ao espaçador frontal foi tido o mesmo cuidado, mas neste caso foi necessário garantir a presença de adesivo por cima e por baixo da lâmina de barbear para produzir a pré-fenda. À medida que foi colocado o adesivo na proporção adequada, colocou-se o substrato superior por basculamento de forma a evitar a formação de porosidades e vazios na camada de adesivo. Foi realizada pressão sobre o substrato superior na zona da localização dos espaçadores de forma a que todo o excesso de adesivo fosse expelido, garantindo assim a espessura uniforme de 1 mm da camada de adesivo.

Com os dois substratos perfeitamente posicionados e alinhados, foram colocadas pinças na zona dos espaçadores, conforme **figura 44**.



Figura 44:Provetes DCB após colagem e montagem, com colocação de pinças para aplicação de pressão durante a cura.

Os provetes foram deixados para cura à temperatura ambiente durante pelo menos uma semana garantindo assim um tempo de cura superior ao especificado na ficha técnica de cada adesivo para cura total do adesivo.

### 3.3.4 Preparação para os ensaios

Finalizado o processo de cura, os provetes são retirados das réguas. Com o auxílio de um torno de bancada e um alicate foram removidos os espaçadores (**figura 45**). Esta operação foi de fácil execução devido às camadas de desmoldante previamente aplicadas.



Figura 45: Remoção do separador frontal de um provete DCB.

Seguidamente foi necessário remover o excesso de adesivo das partes laterais dos provetes. Numa primeira fase e com o auxílio de um alicate remove-se por maior o excesso de adesivo, conforme **figura 46**.



Figura 46: Remoção com alicate do excesso de adesivo de um provete DCB.

Numa segunda fase e para concluir a limpeza, recorreu-se a uma furadora equipada com uma mó, na qual as faces laterais dos provetes são passadas várias vezes na mó até à

remoção total do adesivo, e obtenção de uma superfície lisa na qual o adesivo fica à face dos substratos, conforme **figura 47**.



Figura 47: Limpeza com mó do excesso de adesivo de um provete DCB.

Na **figura 48** pode-se observar o acabamento da superfície lateral de um dos provetes produzidos.



Figura 48: Acabamento da superfície lateral de um provete DCB.

Terminado o processo de limpeza das superfícies laterais dos provetes do excesso de adesivo procedeu-se à colagem das dobradiças nos substratos inferiores e superiores, foi utilizado para esse fim o adesivo Araldite® AV138. Para esta operação começou-se por aplicar um tratamento superficial numa das faces do provete onde foi colada a dobradiça, assim como na face de ligação da dobradiça. O tratamento consistiu na granalhagem e limpeza com acetona da área de colagem no provete e na dobradiça. Seguidamente, foi realizada a pesagem dos componentes do adesivo e a sua homogeneização com uma espátula, e com o auxílio da espátula depositou-se o adesivo na face tratada da dobradiça. Esta foi então posicionada sobre a zona tratada do provete e, de seguida, removeu-se o

excesso do adesivo entre a dobradiça e o topo do provete para evitar a colagem dos dois substratos na zona não ligada, seguindo-se o posicionamento final e a cura.

A **figura 49** mostra os passos da colagem da primeira dobradiça no provete. Após a cura foi colada a segunda dobradiça no outro substrato do provete, utilizando o mesmo procedimento.



Figura 49: Colagem da primeira dobradiça no provete DCB.

Concluída a colagem das dobradiças nos provetes e da limpeza dos mesmos, foi necessário pintar com tinta de corrector uma das faces laterais (na linha da junta do adesivo) para melhorar a visibilidade de propagação da fenda ao longo da junta durante o ensaio.

A**figura 50** ilustra esta operação.



Figura 50: Aplicação de tinta correctora numa face lateral do provete DCB.

Com uma das faces laterais de todos os provetes pintada realizou-se a colagem das escalas, uma em cada substrato, fazendo coincidir a marca colocada referente aos 10 mm da escala com o início da fenda, para posterior aplicação do método óptico. De referir que a fenda foi propagada manualmente entre 1 e 2 mm antes da colagem da escala, para posicionamento desta. Por outro lado, os pontos da escala superior e os da escala inferior devem ficar perfeitamente alinhados entre si. O bordo da escala do lado do adesivo deverá ficar 1 mm afastado do bordo da camada do adesivo para não existir de obstrução de propagação da fenda e para não impossibilitar a medição do comprimento de fenda.

A **figura 51** mostra o posicionamento correcto das escalas.

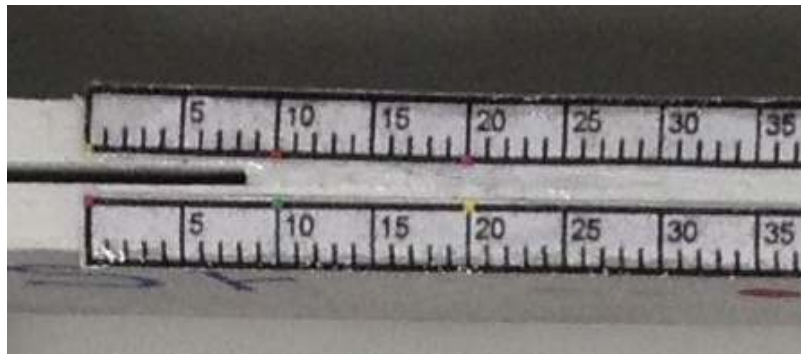


Figura 51: Posicionamento das escalas na face lateral do provete DCB.

A **figura 52** ilustra três provetes DCB prontos para ensaio.



Figura 52: Provetes DCB com escalas coladas.

### 3.4 Ensaio dos provetes DCB

A realização dos ensaios DCB decorreu no Laboratório de Ensaio de Materiais do ISEP. Foi utilizada uma máquina servo-hidráulica Shimadzu AG-X 100 equipada com uma célula de carga de 100 kN. A máquina de ensaio encontra-se em comunicação com um computador de aquisição de dados, registando assim o tempo, a carga aplicada e o deslocamento das maxilas da máquina. Com o registo dos valores de força e deslocamento, obtêm-se as curvas  $P-\delta$ .

Tabela 7 – Dimensões efectivas dos 18 provetes DCB.

Adesivo	Proвете	Comprimento $L$ [mm]	Largura $B$ [mm]	Espessura $h$ [mm]	Pré-fenda $a_0$ [mm]
SikaForce® 7888	SF_1	143,07 / 143,06	27,11 / 26,60	3,02 / 3,01	48,15
	SF_2	143,06 / 143,04	26,68 / 26,79	3,00 / 3,04	45,80
	SF_3	143,05 / 143,03	26,80 / 26,98	3,03 / 3,06	47,82
	SF_4	143,06 / 143,04	26,83 / 26,85	3,03 / 3,03	47,78
	SF_5	143,09 / 143,07	27,02 / 26,73	3,02 / 3,03	46,31
	SF_6	143,08 / 143,06	26,82 / 26,81	3,01 / 3,02	46,85
Araldite® 2015	A2_1	143,06 / 143,02	27,02 / 26,73	3,06 / 3,06	46,68
	A2_2	143,07 / 143,13	26,82 / 26,81	3,01 / 3,03	47,35
	A2_3	143,12 / 143,12	26,91 / 26,88	3,03 / 3,00	47,40
	A2_4	143,02 / 143,11	26,89 / 26,89	3,02 / 3,04	46,37
	A2_5	143,10 / 143,00	26,98 / 27,02	3,01 / 3,02	46,92
	A2_6	143,04 / 143,04	27,03 / 26,86	3,03 / 3,00	46,06
Araldite® AV138	AV_1	143,06 / 143,03	27,05 / 26,94	3,03 / 3,03	49,35
	AV_2	143,06 / 143,08	26,81 / 26,55	3,02 / 3,01	47,26
	AV_3	143,07 / 143,13	26,89 / 26,77	3,06 / 3,01	46,43
	AV_4	143,03 / 143,34	26,93 / 26,90	3,01 / 3,02	47,84
	AV_5	143,06 / 143,13	26,91 / 26,95	3,02 / 3,03	45,89
	AV_6	143,19 / 143,08	26,90 / 27,05	3,01 / 3,04	46,89



### 3.4.1 Geometria dos provetes

Produzidos os dezoitos provetes DCB, seis por cada tipo de adesivo, foi necessário realizar a sua identificação por tipo de adesivo. Para os seis provetes cujo adesivo utilizado foi o SikaForce® 7888, foram identificados com as letras "SF", sendo designados por SF\_1, SF\_2, SF\_3, SF\_4, SF\_5 e SF\_6. Para os seis provetes cujo adesivo utilizado foi a Araldite® 2015a identificação consistiu na letra A e o numero dois "A2", sendo designados por A2\_1, A2\_2, A2\_3, A2\_4, A2\_5 e A2\_6. Para os seis provetes cujo adesivo utilizado foi a Araldite® AV138 foi utilizado o mesmo principio, e os provetes foram identificados com duas letras "AV", sendo designados por AV\_1, AV\_2, AV\_3, AV\_4, AV\_5 e AV\_6.

Com os provetes identificados por adesivo utilizado e numerados, realizou-se a medição das suas dimensões reais. Foram realizadas duas medições de  $L$ ,  $B$  e  $h$  em posição limite, consideradas nos tratamentos dos dados subsequentes aos ensaios, e foi considerado o valor médio das duas medições. As dimensões reais encontram-se registadas na **tabela 7**.

### 3.4.2 Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente na máquina de ensaios (shimadzu AG-X 100), com uma célula de carga de 100 kN. A gravação dos dados foi realizada a 5 Hz para a carga ( $P$ ) e deslocamento ( $\delta$ ), registados durante o ensaio, como uma função do tempo decorrido desde a sua iniciação. Foram tiradas fotos durante o teste dos provetes com 5 segundos de intervalo, usando uma câmara digital com uma resolução de 18 megapixels e processador de imagem DIGIC 5, sem zoom e distância focal fixa de aproximadamente 100 mm à face visível dos provetes. A câmara foi posicionada de forma a captar a face lateral do provete desde o inicio da escala até um comprimento de fenda de aproximadamente 35 mm (**figura 53**).

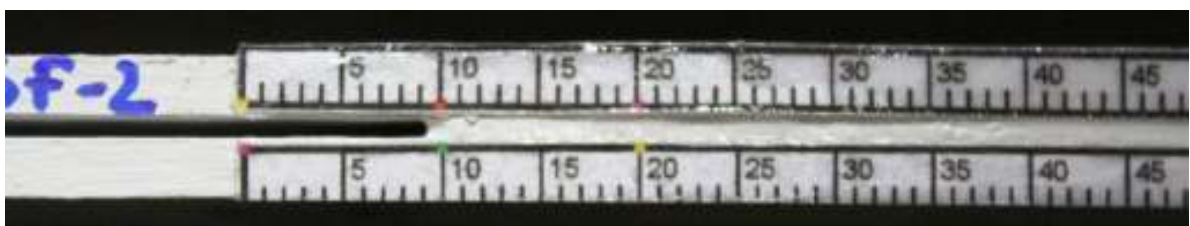


Figura 53:Face lateral do provete captada pela câmara.

Este procedimento permitiu correlacionar os dados de  $P$  e  $\delta$  com o comprimento da fenda ( $a$ ), abertura da fenda na ponta da fenda ( $\delta_l$ ) e rotação dos aderentes na ponta da fenda ( $\theta_0$ ), que são necessários para a obtenção de  $G_{Ic}$  pelos vários métodos. Esta correlação é feita pelo conhecimento do instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaio dos provetes (57; 67).

### 3.4.3 Método óptico utilizado neste trabalho

Para a determinação dos parâmetros  $\delta_l$  e  $\theta_0$  para uma determinada imagem, o método óptico necessita da marcação de oito pontos no provete DCB, conforme indicados na **figura 54**: dois pontos ( $p_1, p_2$ ) para medir o valor de  $t_A$  na ponta da fenda ( $t_A^{CT}$ ) durante a aplicação da carga em unidades de imagem (pixels), dois pontos ( $p_3, p_4$ ) definem um segmento de recta na imagem para a qual o comprimento ( $d$ ) é conhecido em unidades SI (mm), dois pontos ( $p_5, p_6$ ) no substrato superior do provete e dois pontos ( $p_7, p_8$ ) no substrato inferior.



Figura 54: Identificação dos pontos para determinar o  $\theta_0$  e  $\delta_l$ .

Para registo fotográfico da propagação da fenda recorreu-se a uma câmara fotográfica digital da Canon EOS 650D com uma resolução de 18 megapixels, processador de imagem DIGIC 5 com sistema de focagem automática de 9 pontos e equipada com uma lente EF-S de 18 a 55 mm, mostrada na **figura 55**.



Figura 55: Meio óptico utilizado nos ensaios.

#### 3.4.3.1 Identificação dos pontos das imagens

Todos os oito pontos na primeira foto são identificados manualmente com apoio de um *software*. A localização dos pontos é auxiliada pelas réguas coladas aos provetes. Após a localização de todos os pontos na primeira foto, estes são identificados automaticamente nas fotos seguintes utilizando um algoritmo implementado em Matlab<sup>®</sup>(57; 67). Basicamente, para cada ponto  $p_i$  é definida uma região rectangular centrada no ponto  $p_i$  e extraída a partir da primeira foto formando um modelo ( $t$ ). Este modelo define o padrão de imagem que rodeia o ponto e é usado para localizar o ponto na foto seguinte. Isto é feito por determinação da posição ( $u, v$ ) na imagem seguinte ( $I$ ) cuja correlação cruzada normalizada com o modelo é maior. A correlação cruzada normalizada é uma medida de semelhança entre duas imagens em tons de cinza que não é sensível a mudanças lineares de iluminação e que quantifica a correlação entre níveis de cinza da região de duas fotos (57; 67). Este método de semelhança foi escolhido pela sua baixa complexidade computacional, devido à alta resolução das fotos, e possível de utilizar por causa das pequenas mudanças na rotação da escala dos provetes entre duas fotos consecutivas (separadas por 5 segundos). A correlação cruzada normalizada ( $\gamma$ ) do modelo de imagem  $t$  com a posição ( $u, v$ ) da foto é definida por:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] \cdot [t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \cdot \sum_{x,y} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0,5}} \quad (2.28)$$

onde  $f$  é a região da imagem  $I$  com o mesmo tamanho de  $t$  centrado na posição  $(u, v)$ . O valor máximo absoluto calculado para  $\gamma$  define a localização da região  $I$  que tem a maior correlação com a de  $t$  e, assim, o local mais provável de  $p_i$  na foto seguinte. Isto é feito para cada um dos oito pontos identificados na primeira foto. Depois de identificados com êxito todos os pontos na segunda foto, são definidos os novos padrões na segunda foto para pesquisar os oito pontos na terceira foto, e assim por diante até à análise de todas as fotos.

### 3.4.3.2 Computação de $\delta$

Para o cálculo de  $\delta_i$  torna-se necessário determinar o valor de  $t_A^{CT}$  em unidades SI. O seu valor em milímetros é dado por:

$$t_A^{CT} = d \frac{|p_1 - p_2|}{|p_3 - p_4|} \quad (2.29)$$

Sendo a distorção da lente desprezável para fotos obtidas com câmaras digitais modernas (57). Em todos os ensaios dos provetes foi fotografada uma região com o comprimento de aproximadamente  $d=45$  mm, conforme **figura 56**.



Figura 56: Identificação da região fotografada nos ensaios.

Em média, o tamanho do pixel era de 0,024 mm e, deste modo, o erro máximo estimado do processo de aquisição de imagens é de  $\pm 0,012$  mm. Finalmente  $\delta_I$  pode ser definido como:

$$\delta_1 = t_A^{CT} - t_A \quad (2.30)$$

onde  $t_A$  é o valor de cálculo teórico de 1 mm. O valor de  $t_A$  pode ter pequenas variações introduzidas pelo processo de fabrico, sendo necessário fazer o ajuste de  $\delta_1$  no início do ensaio para  $\delta_1=0$  (tempo de ensaio = 0).

### 3.4.3.3 Computação de $\theta_0$

O valor de  $\theta_0$  é calculado como o ângulo formado pelas rectas  $l_1$  e  $l_2$ , conforme mostra a **figura 57**. As rectas são directamente definidas pelos pontos  $(p_5, p_6)$  e  $(p_7, p_8)$ , respectivamente. Para minimizar as flutuações do processo e aumentar a resolução da detecção dos pontos, é utilizado um algoritmo de processamento de imagem para traçar a recta no meio da aresta da régua que contém o par dos pontos (57; 67). Com a aplicação de um filtro gaussiano é melhorado o contraste da borda da escala, resultando numa imagem em que os pixels pertencentes às arestas têm alta intensidade, enquanto os restantes são de baixa intensidade. Seguidamente, para as linhas da imagem entre  $p_5$  e  $p_6$  é calculado o ponto médio da aresta em cada linha.

O primeiro ponto médio é extraído para a linha de  $p_5$ , e para tal são recolhidos todos os pixels possíveis de alcançar à esquerda e direita de  $p_5$  sem deixar cair a intensidade abaixo de um determinado limiar (10% para todos os ensaios). Usa-se uma ponderação da intensidade de todos os pixels recolhidos de modo que os pixels com mais intensidade, ou seja, os pixels pertencentes à borda da escala, tenham um impacto maior no cálculo do ponto médio da linha. O processo torna-se assim eficaz em relação à desfocagem no método de identificação dos pontos, pelo que os pontos  $p_5$  e  $p_6$  não necessitam de ser identificados exactamente na linha média da borda. O processo é repetido para todas as linhas seguintes até atingir  $p_6$ , resultando num ponto de cada linha da imagem entre  $p_5$  e  $p_6$  que define a linha média da aresta da escala. Como estes pontos não estão necessariamente alinhados, é utilizada uma regressão linear para a obtenção de  $l_1$ . O mesmo processo é utilizado para os pontos  $(p_7, p_8)$  para obtenção de  $l_2$  e, finalmente é obtido  $\theta_0$ , o ângulo formado pelas duas rectas:

$$\theta_0 = \arccos\left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| |\vec{v}_2|}\right) \quad (2.31)$$

onde  $\vec{v}_1$  e  $\vec{v}_2$  são os vectores de direcção das rectas  $l_1$  e  $l_2$ , respectivamente.



Figura 57: Identificação das rectas  $l_1$  e  $l_2$  usadas para determinar  $\theta_0$ .

#### 3.4.4 Preparação do sistema óptico

Após a montagem das maxilas na máquina de ensaio rodadas a  $45^\circ$ , procedeu-se à colocação dos provetes na posição em que os ensaios vão ser realizados. A colocação do provete na máquina de ensaio na posição indicada tem como finalidade facilitar o posicionamento e a calibração do meio óptico para captação das fotografias(**figura 58**).



Figura 58 Proвете colocado nas maxilas da Shimadzu AG-X 100.

Conforme já referido, a câmara fotográfica foi fixa a um suporte rígido a uma distância aproximada de 100 mm do provete. Houve o cuidado especial de garantir que a câmara estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para garantir fotografar a zona de interesse do provete durante a totalidade do ensaio (**figura 59**).



Figura 59: Provete e meio óptico posicionado para realização do ensaio.

A fixação da câmara garante que todas as mudanças entre as fotos do mesmo teste são devidas aos deslocamentos e deformações do provete.

#### **3.4.5 Realização dos ensaios**

Para todos os provetes, a máquina de ensaios foi ajustada para uma velocidade de 0,5 mm/min com a gravação dos dados realizada a 5 Hz. Houve o cuidado especial de garantir que a câmara estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para fotografar uma região no mínimo de 40 mm da escala (**figura 60**).



Figura 60: *Setup* do ensaio, com provete sob tracção e equipamento fotográfico.

Antes do início do ensaio é tirada a foto “0”. Iniciado o ensaio são tiradas fotos de 5 em 5 segundos até que a fenda atinja os 40 mm (**figura 61**), continuando o ensaio mecânico até que a rotura seja atingida.



Figura 61: Posições inicial e propagação da fenda a 30 mm de um dos ensaios.

#### 3.4.6 Adesivo SikaForce® 7888

Após ensaiar os provetes e proceder ao tratamento dos dados, obtiveram-se as curvas  $P-\delta$ . Na **figura 62** encontram-se reunidas todas as curvas  $P-\delta$  obtidas para os seis provetes realizados com o adesivo SikaForce® 7888. De uma forma geral, constata-se que as curvas apresentam alguma coerência em termos de rigidez elástica, carga máxima e comportamento durante a propagação do dano, embora alguns aspectos menos positivos sejam particularizados de seguida.



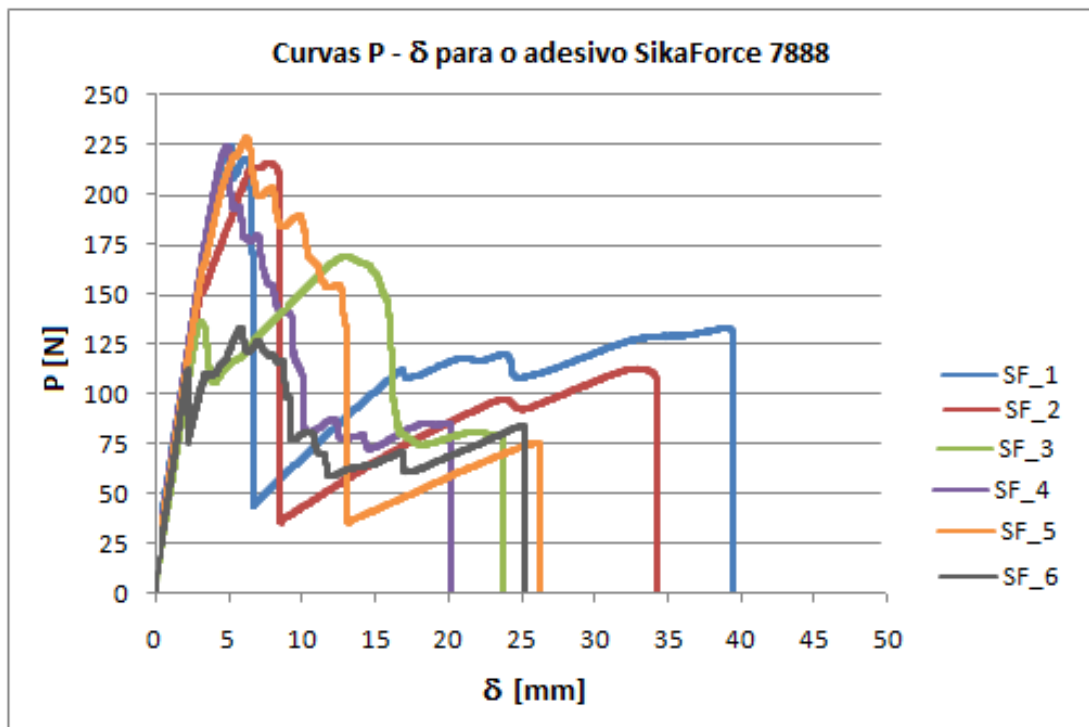


Figura 62: Evolução das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo SikaForce® 7888.

Pela análise das curvas apresentadas, verifica-se que inicialmente o valor da carga aplicada aumenta linearmente com o deslocamento (regime elástico). Um pouco antes da carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), verifica-se o aparecimento de alguma não linearidade correspondente à formação da ZPF.

Os provetes SF\_3 e SF\_6 tiveram uma ruptura antes de atingirem a carga máxima, ficando esta respectivamente na ordem dos 76,2% e 59,6% da média da carga máxima dos restantes quatro. Na vizinhança de  $P_{\text{máx}}$ , a energia armazenada do provete atinge o seu valor crítico,  $G_{\text{lc}}$ , correspondente ao início de propagação da fenda. A partir deste momento deveria iniciar-se um regime de propagação estável da fenda, caracterizado por uma diminuição progressiva da carga com o aumento do deslocamento. No entanto, verifica-se a evolução instável de  $P$ , correspondente a uma propagação instável da fenda. Este fenómeno encontra-se relacionado com a dificuldade de ligação deste adesivo, já demonstrado no trabalho (68), e confirmado pela rotura parcialmente adesiva (**figura 63**), assim como uma provável incorrecta mistura dos dois componentes constituintes do adesivo por possível deficiência do bico de mistura.

A **figura 63** mostra-nos em detalhe as superfícies de rotura para este adesivo e para a totalidade dos provetes (rotura mista).



Figura 63: Superfícies de rotura do adesivo SikaForce® 7888.

Na **tabela 8** estão registados os valores da força máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), o deslocamento à carga máxima ( $\delta_{P_{\text{máx}}}$ ), o deslocamento máximo ( $\delta_{\text{máx}}$ ), a energia libertada desde o início até à carga máxima ( $E_{P_{\text{máx}}}$ ) e a energia libertada desde o início até à ruptura ( $E_{\delta_{\text{máx}}}$ ).

Tabela 8 – Valores de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta_{P_{\text{máx}}}$ ,  $\delta_{\text{máx}}$ ,  $E_{P_{\text{máx}}}$  e  $E_{\delta_{\text{máx}}}$  para o adesivo SikaForce® 7888.

Proвете	$P_{\text{máx}}[\text{N}]$	$\delta_{P_{\text{máx}}}[\text{mm}]$	$\delta_{\text{máx}}[\text{mm}]$	$E_{P_{\text{máx}}}[\text{J}]$	$E_{\delta_{\text{máx}}}[\text{J}]$
SF_1	224,66	5,44	39,71	0,68	4,52
SF_2	215,65	7,95	34,39	1,14	3,43
SF_4	224,24	5,17	20,49	0,64	2,29
SF_5	228,45	6,43	26,42	0,89	2,87
Média	223,25	6,25	30,25	0,84	3,28
Desvio Padrão	5,40	1,26	8,49	0,2	0,94

Como valores médios obteve-se  $P_{\text{máx}}=223,25\pm 5,40$  N,  $\delta_{P_{\text{máx}}}=6,25\pm 1,26$  mm,  $\delta_{\text{máx}}=30,26\pm 8,49$  mm,  $E_{P_{\text{máx}}}=0,8428\pm 0,2323$  J e  $E_{\delta_{\text{máx}}}=3,2829\pm 0,9494$  J.

Sabendo que o produto da força com o deslocamento é uma energia, foi realizado segundo este princípio o cálculo das energias. Determinado o valor de cada  $\Delta\delta$  ( $\Delta\delta=\delta_{j+1}-\delta_j$ ) para cada 0,2 segundos, multiplicando pelo valor da força nesse instante, dá-nos a energia necessária para realizar o deslocamento  $\Delta\delta$ . O somatório da energia de todos os  $\Delta\delta$  até ao

valor da força máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), dá-nos o valor de ( $E_{P_{\text{máx}}}$ ). O sumatório da energia de todos os  $\Delta\delta$  até ao valor do deslocamento máximo ( $\delta_{\text{máx}}$ ) dá-nos o valor de  $E_{\delta_{\text{máx}}}$ .

São excluídos da análise efectuada os provetes SF\_3 e SF\_6 devido ao comportamento bastante diferente dos restantes. Como se pode verificar na **figura 63** estes tiveram uma rotura marcadamente adesiva.

#### 3.4.6.1 Determinação do $G_{Ic}$

A **figura 64** representa uma das curvas de resistência experimental, também designada por curva- $R$ . São apresentadas as curvas referentes aos três métodos convencionais, o CCM e CBT, que requerem a medição do comprimento de fenda e o CBBM, baseado no comprimento de fenda equivalente. Estas curvas- $R$  relacionam a evolução de  $G_I$  com  $a$  ou  $a_{eq}$  para uma amostra testada, a qual é representativa dos resultados globais para os provetes realizados com o adesivo SikaForce® 7888. A correspondência das curvas entre os métodos é bastante razoável.

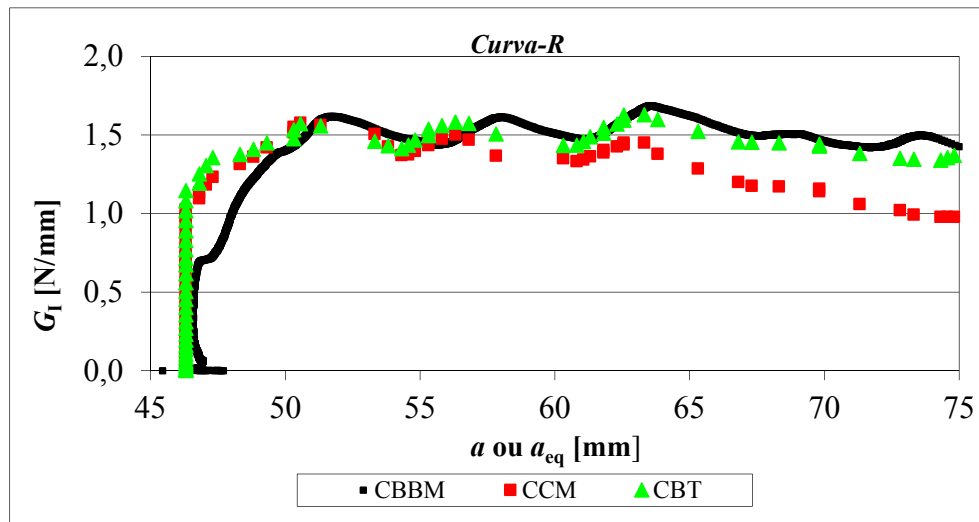


Figura 64: Curvas- $R$  determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo SikaForce® 7888.

Para determinação do  $G_{Ic}$  pelo método óptico, inicialmente por meio da técnica descrita em 3.4.3.3, foi estimado  $\theta_0$  para cada ensaio em função do tempo decorrido desde o início do mesmo. A **figura 65** mostra a evolução de  $\theta_0$  para um ensaio específico de uma amostra. A

figura representa a curva primitiva, a curva polinomial do quarto grau usada para diminuição do ruído e a curva ajustada, adoptando  $\theta_0=0$  no início do ensaio. Para cada provete testado foi seleccionado o grau mais adequado, escolhendo o melhor factor de correlação ( $R$ ) do polinómio de segundo a sexto grau ajustado à curva primitiva. Em todos os ensaios  $R$  variou entre 0,99000 e 0,99877. O ajustamento à curva polinomial tem como finalidade anular o efeito do eventual desalinhamento inicial entre as escalas coladas nos aderentes, cujas marcas foram usadas para estimar  $\theta_0$ .

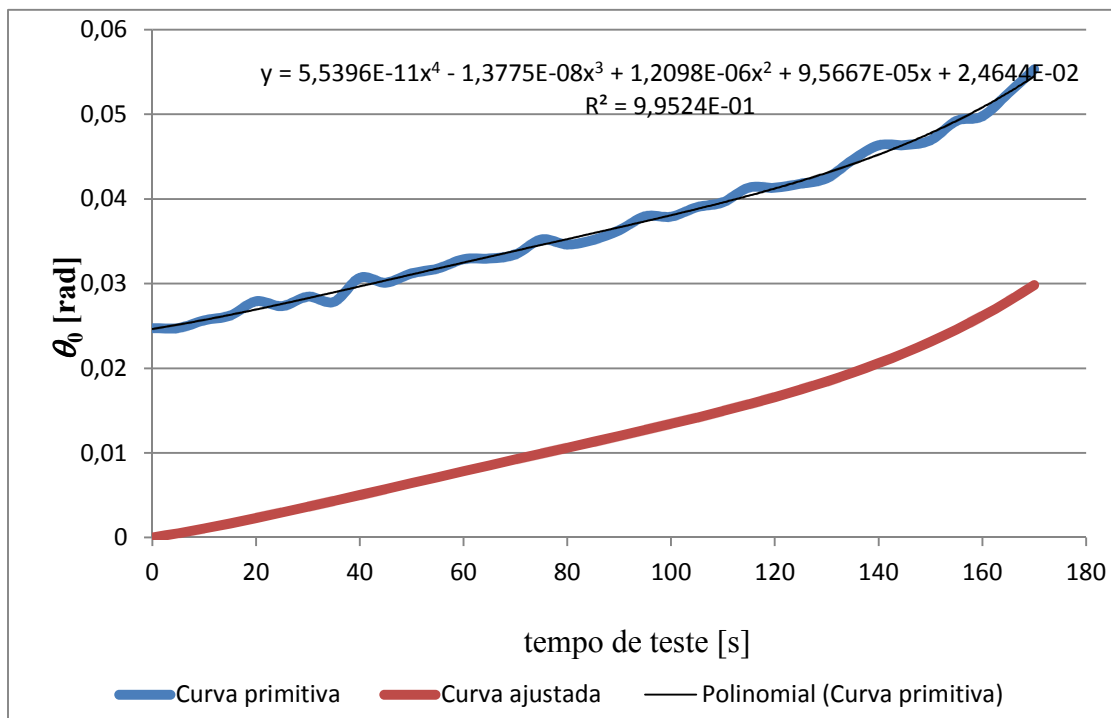


Figura 65: Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7888: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

Pela técnica descrita em 3.4.3.2., faz-se a determinação do valor de  $\delta_1$  para cada provete, também em função do tempo de ensaio. A **figura 66** mostra a curva primitiva a partir das medições ópticas, a curva polinomial ajustada ao quarto grau e a curva ajustada. Foi realizado um ajuste final para que  $\delta_1=0$  coincida com o zero do tempo de teste. Esta necessidade de ajuste surge de pequenos desvios ao valor de  $t_A$ , devido ao facto de as marcas usadas para medição de  $\delta_1$  estarem afastadas entre si de uma distância superior a  $t_A$ . Para cada provete testado foi seleccionado o grau polinomial mais adequado, escolhendo o

melhor factor de correlação ( $R$ ) do polinómio de segundo a sexto grau ajustado à curva primitiva. O valor de  $R$  variou entre 0,91250e 0,99683.

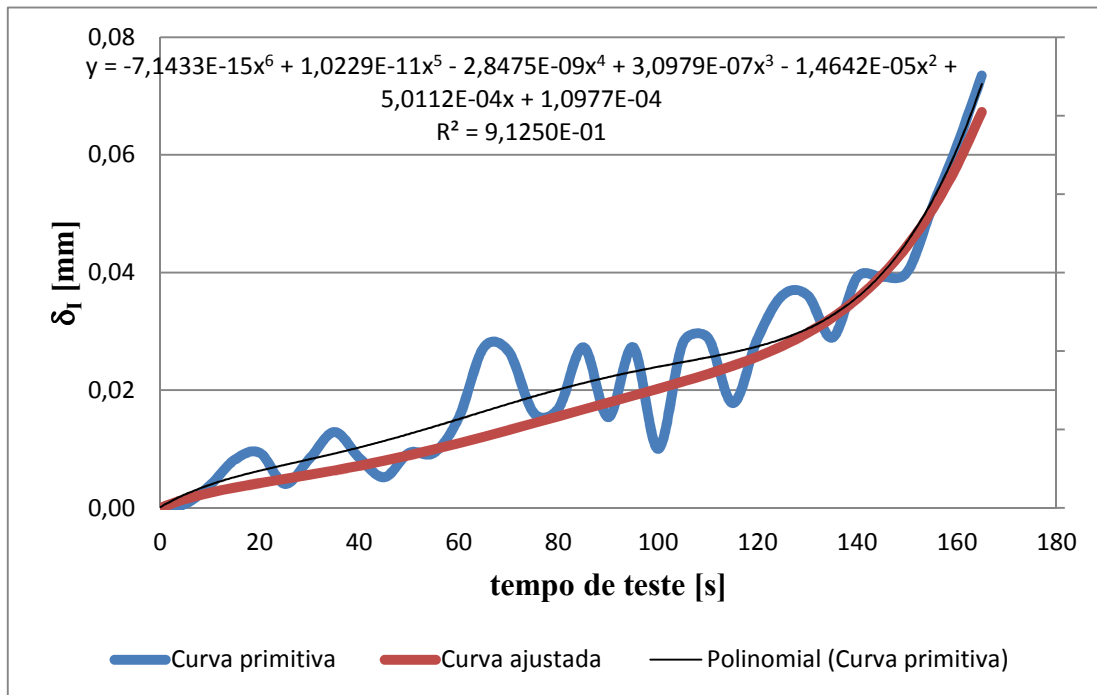


Figura 66: Evolução do  $\delta_I$  no ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888: Curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

Os valores de  $G_I$  para as amostras foram definidos através da representação gráfica das curvas de  $G_I$ - $\delta_I$  até ao início da propagação da fenda. A **figura 67** mostra a curva da lei experimental  $G_I$ - $\delta_I$  e a curva polinomial correspondente ajustada ao quinto grau para o provete considerado nas figuras anteriores. No início do ensaio,  $G_I$  aumenta lentamente com  $\delta_I$ , mas a taxa de crescimento de  $G_I$  aumenta rapidamente até 0,02 mm. Segue-se uma zona de crescimento de  $G_I$  a taxa constante entre  $0,02 \leq \delta_I \leq 0,06$  mm, sendo o seu valor estacionário alcançado aproximadamente para  $\delta_I = 0,09$  mm. Para este ensaio, o valor medido de  $G_{Ic}$  é de 1,246 N/mm. A lei experimental de  $G_I$ - $\delta_I$  foi representada de forma semelhante para todos os ensaios ajustando a curva polinomial ao grau mais preciso. Em todos os ensaios o valor de  $R$  variou entre 0,98850 e 0,99928.

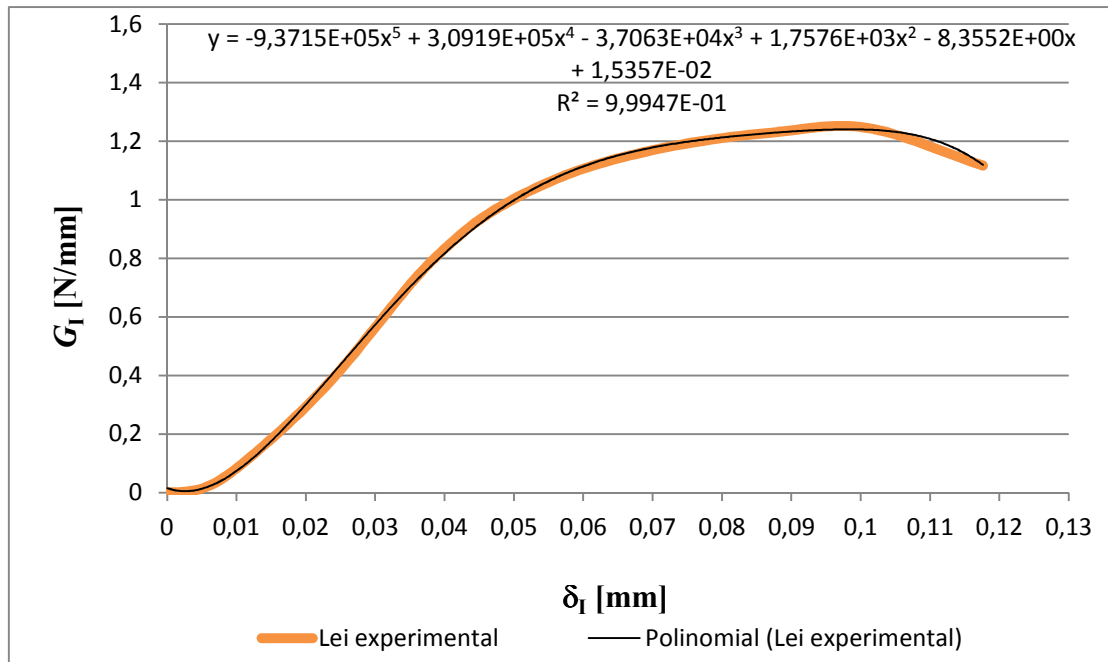


Figura 67: Lei  $G_I$ - $\delta_I$  experimental de ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888 e ajuste de curva polinomial.

A **tabela 9** resume os valores de  $G_{Ic}$  (N/mm) dos seis ensaios por todos os métodos: a concordância entre as amostras é razoavelmente boa, excluindo os valores relativos aos provetes SF\_3 e SF\_6 por estes terem iniciado a ruptura antes de atingirem a carga máxima, conforme se pode confirmar na **figura 64**.

Tabela 9 – Valores de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos para SikaForce® 7888.

Provete	CBBM N/mm	CCM N/mm	CBT N/mm	Integral-J N/mm
SF_1	1,423	-----	1,433	1,246
SF_2	1,789	1,277	1,580	1,533
SF_4	1,208	1,166	1,163	1,220
SF_5	1,557	1,413	1,538	1,418
Média	1,494	1,285	1,428	1,354
Desvio Padrão	0,244	0,124	0,188	0,148

É de realçar que não foi possível obter resultados pelo CCM para o provete SF\_1 devido a dificuldades de ajuste do polinómio. Comparando os quatro métodos, observa-se uma

diferença aceitável entre cada provete e os valores de desvio padrão para cada método de obtenção de  $G_{Ic}$ . Para o CBBM obteve-se  $G_{Ic}=1,494\pm0,244$  N/mm, para o CCM,  $G_{Ic}=1,285\pm0,124$  N/mm, para o CBT,  $G_{Ic}=1,428\pm0,188$  N/mm, e para o integral- $J$ ,  $G_{Ic}=1,354\pm0,148$  N/mm. Comparando com valores na literatura para este mesmo adesivo, destaca-se o trabalho de Campilho et al.(57), onde se obteve  $G_{Ic}=1,103\pm0,405$  N/mm para substratos de compósito de fibras naturais, e o trabalho também de Campilho et al (67), onde se obteve  $G_{Ic}=1,095\pm0,1955$  N/mm para substratos de alumínio com 4 mm de espessura.

### 3.4.6.2 Determinação da lei coesiva em tracção

A **figura 68** mostra a curva da lei coesiva em tracção  $\sigma_I$ - $\delta_I$  obtida por derivação numérica dos dados obtidos pela curva  $G_I$ - $\delta_I$  experimental, mostrando as características de ductilidade do adesivo, após ser atingido o valor máximo de  $\sigma_I$ . Para este provete, foi encontrado o valor de  $\sigma_I=25,03$  MPa e  $\delta_I=0,078$  mm.

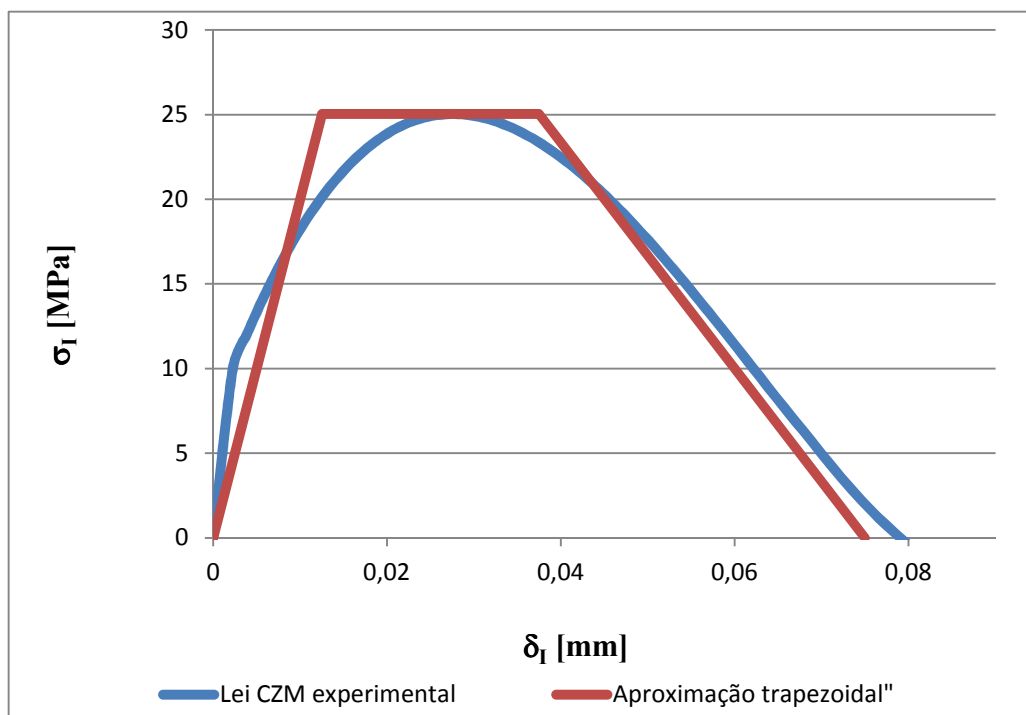


Figura 68: Lei  $\sigma_I$ - $\delta_I$  experimental de ensaio de um provete com adesivo SikaForce® 7888 e aproximação trapezoidal.

A lei CZM trapezoidal proposta e apresentada na **figura 68** permite concluir que para o adesivo SikaForce® 7888 uma lei trapezoidal é particularmente adequada, dado representar com precisão a ductilidade do adesivo.

### 3.4.7 Adesivo Araldite® 2015

Após ensaiar os provetes com adesivo Araldite® 2015 e proceder ao tratamento dos dados, obtiveram-se inicialmente as curvas  $P-\delta$ . Na **figura 69** encontram-se reunidas todas as curvas  $P-\delta$  obtidas para os seis provetes realizados com o adesivo Araldite® 2015 e, de uma forma geral, constata-se que estas apresentam uma boa repetibilidade no que concerne à rigidez elástica (antes da propagação da fenda), carga máxima, comportamento durante a propagação do dano e deslocamento máximo. Comparando com o adesivo SikaForce® 7888 regista-se uma evolução da carga durante a propagação muito mais estável, o que será justificado pelo tipo de rotura obtido.

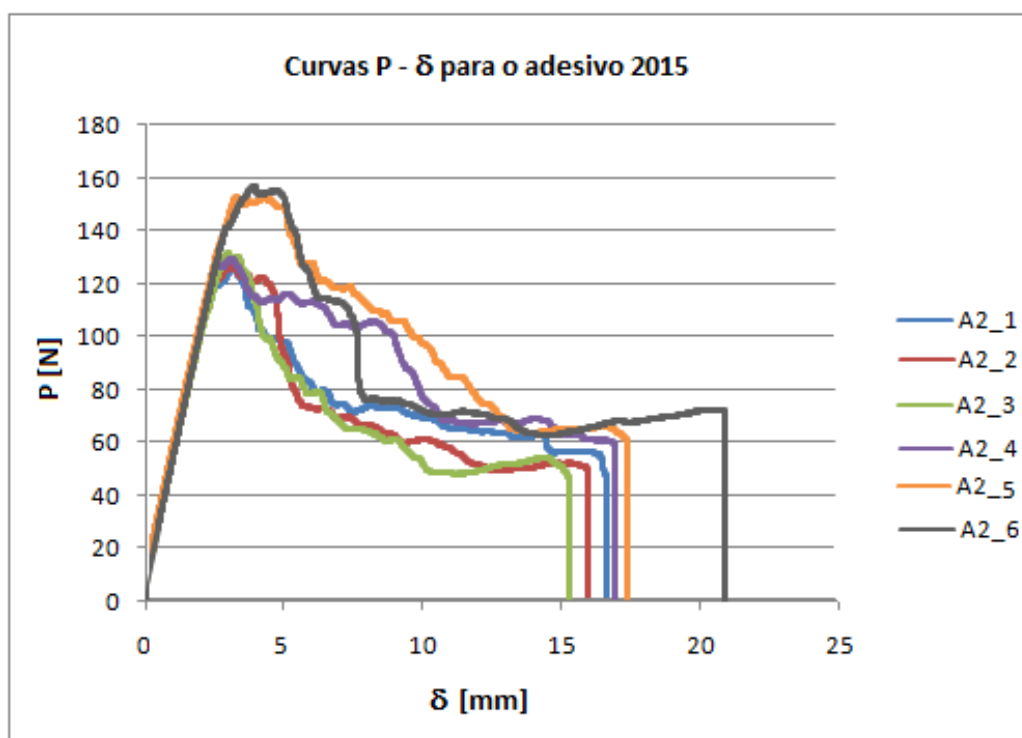


Figura 69: Evolução das curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015.

Pela análise das curvas apresentadas, verifica-se a existência de três fases. Na primeira fase, a evolução da força/deslocamento é linear com um comportamento assumidamente



reversível, ou seja, regime elástico. Na segunda fase, um pouco antes da carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), observa-se uma perda de linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível no adesivo, formação da ZPF. Na vizinhança de  $P_{\text{máx}}$ , a energia armazenada do provete atinge o seu valor crítico,  $G_{\text{Ic}}$ , correspondente ao início de propagação da fenda. Depois de  $P_{\text{máx}}$  ocorre a terceira fase, em que a força aplicada diminui progressivamente ao que corresponde a fase de propagação estável da fenda. No final há uma quebra abrupta, motivada pela ruptura total do provete. Durante o período de propagação, a curva  $P-\delta$  apresenta pequenas ondulações. A justificação para a ocorrência deste fenómeno é o aparecimento de micro-fendas sucessivas que se propagam apenas a uma curta distância, originando uma ligeira diminuição da força. Subsequentemente ao aparecimento da nova micro-fenda, ocorre um gradual aumento da força e assim sucessivamente, até à rotura total do provete.

A **figura 70** mostra-nos as superfícies de rotura para este adesivo. Em todos os ensaios ocorreu rotura coesiva do adesivo. O facto de a rotura ter sido coesiva demonstra a excelente adesão que ocorreu durante o processo de fabrico.



Figura 70: Superfícies de rotura do adesivo Araldite® 2015.

Na **tabela 10** estão registados os valores de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta_{\text{Pmáx}}$ ,  $\delta_{\text{máx}}$ ,  $E_{\text{Pmáx}}$  e  $E_{\delta_{\text{máx}}}$ . O cálculo das energias foi realizado como descrito para o adesivo Araldite® 7888. Pela análise dos dados da tabela pode-se concluir que existe uma boa repetibilidade entre os resultados obtidos para os vários provetes. Neste adesivo não é excluído nenhum provete da análise. Como valores médios chegou-se a  $P_{\text{máx}}=137,39\pm 14,13$  N,  $\delta_{\text{Pmáx}}=2,96\pm 0,29$  mm,  $\delta_{\text{máx}}=16,84\pm 1,88$  mm,  $E_{\text{Pmáx}}=0,2638\pm 0,0447$  J e  $E_{\delta_{\text{máx}}}=1,3823\pm 0,2935$  J.

Tabela 10 – Valores de  $P_{\max}$ ,  $\delta_{P\max}$ ,  $\delta_{\max}$ ,  $E_{P\max}$  e  $E_{\delta\max}$  para o adesivo Araldite® 2015.

Provete	$P_{\max}$ [N]	$\delta_{P\max}$ [mm]	$\delta_{\max}$ [mm]	$E_{P\max}$ [J]	$E_{\delta\max}$ [J]
A2_1	126,18	2,98	16,39	0,24	1,23
A2_2	125,82	2,89	15,67	0,24	1,11
A2_3	132,35	2,72	15,02	0,22	1,06
A2_4	129,44	2,63	16,46	0,23	1,43
A2_5	152,90	3,05	17,11	0,28	1,65
A2_6	157,64	3,44	20,39	0,34	1,78
Média	137,39	2,95	16,84	0,26	1,38
Desvio Padrão	14,13	0,28	1,88	0,04	0,29

### 3.4.7.1 Determinação do $G_{Ic}$

A **figura 71** representa as curvas- $R$ , determinadas pelos três métodos convencionais, o CCM, CBT e o CBBM. A figura apresentada ilustra um dos provetes testados, e cujos resultados são representativos dos resultados globais para os provetes realizados com adesivo Araldite® 2015. Observa-se também neste caso uma boa correspondência entre os três métodos de obtenção de  $G_{Ic}$ .

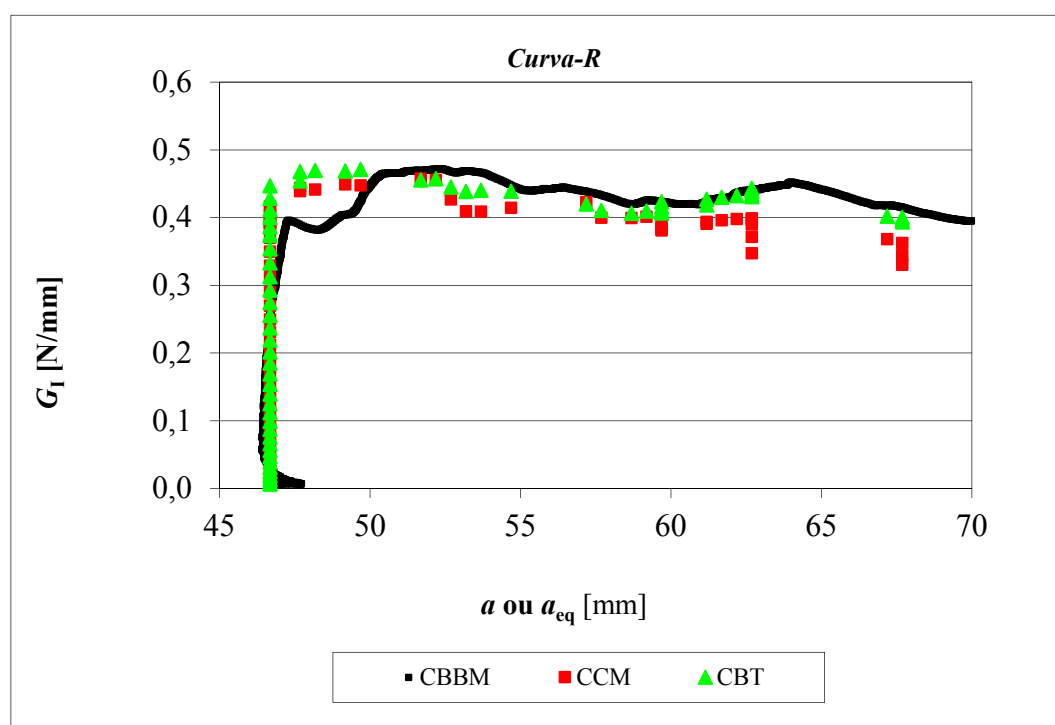


Figura 71: Curvas- $R$  determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo Araldite® 2015.

Por meio da técnica descrita em 3.4.3.3, foi estimado  $\theta_0$  para cada ensaio em função do tempo decorrido desde o início do ensaio, já que pelo integral- $J$  este parâmetro é necessário para a determinação do  $G_{Ic}$ . Na **figura 72** temos representada a curva primitiva, a curva polinomial do quinto grau usada para diminuir o ruído e a curva ajustada, adotando  $\theta_0 = 0$  no início do ensaio. A figura mostra assim a evolução de  $\theta_0$  para um ensaio específico de uma amostra. O ajustamento à curva polinomial tem como finalidade anular o efeito do eventual desalinhamento inicial entre as escalas coladas nos aderentes, cujas marcas foram usadas para estimar  $\theta_0$ . Para cada um dos ensaios realizados entre o polinômio de segundo ao sexto grau foi seleccionado o grau mais adequado à curva primitiva, escolhendo o melhor factor de correlação ( $R$ ). Em todos os ensaios  $R$  variou entre 0,98571 e 0,99764.

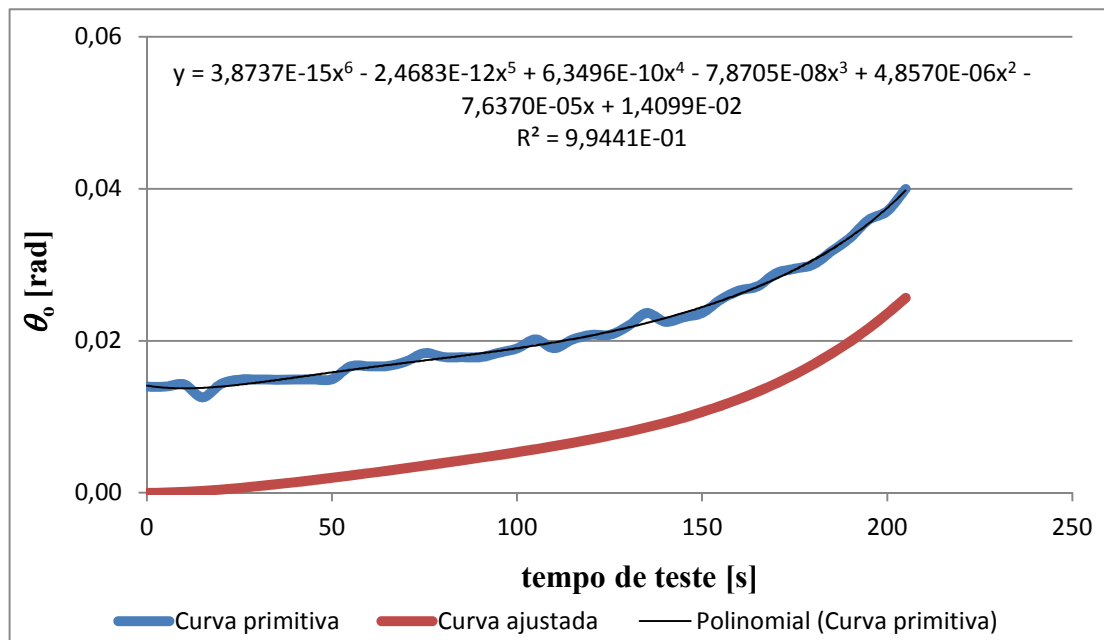


Figura 72: Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

Para determinar o valor de  $\delta$  de cada provete ensaiado, foi utilizada a técnica descrita em 3.4.3.2. A **figura 73** mostra a evolução de  $\delta$  para um ensaio específico de uma amostra. Foi realizado um ajuste final para que  $\delta=0$  coincida com o zero do tempo de teste. Esta necessidade de ajuste surge de pequenos desvios ao valor de  $t_A$ , devido ao facto de as

marcas usadas para medição de  $\delta_I$  estejam afastadas entre si de uma distância superior a  $t_A$ . Na figura temos representada a curva primitiva a partir das medições ópticas, a curva polinomial ajustada ao quinto grau e a curva ajustada. Para cada provete ensaiado foi escolhido o melhor factor de correlação ( $R$ ) entre o polinómio de segundo a sexto grau ajustado à curva primitiva, seleccionando assim o grau polinomial mais adequado. O valor de  $R$  variou entre 0,92009 e 0,95753.

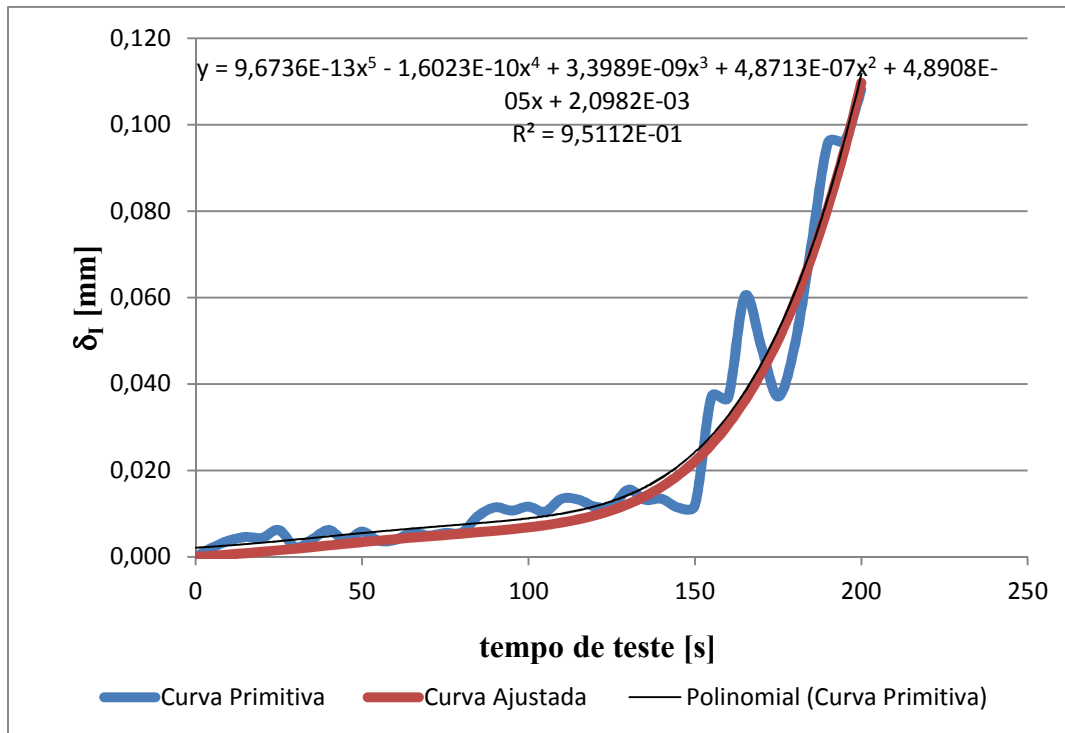


Figura 73: Evolução de  $\delta_I$  no ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

O valor de  $G_I$  para cada amostra foi definido através da representação gráfica da curva de  $G_I$ - $\delta_I$ . Para o provete considerado nas figuras anteriores, a **figura 74** representa a curva da lei experimental  $G_I$ - $\delta_I$  e a curva polinomial correspondente ajustada ao sexto grau. No início do ensaio,  $G_I$  aumenta lentamente com  $\delta_I$  até 0,003 mm. Segue-se uma zona de crescimento de  $G_I$  a taxa constante entre  $0,003 \leq \delta_I \leq 0,009$  mm, sendo o seu valor estacionário alcançado aproximadamente para  $\delta_I = 0,021$  mm. Para este ensaio, o valor medido de  $G_{Ic}$  é de 0,437 N/mm. A lei experimental de  $G_I$ - $\delta_I$  foi representada de forma

semelhante para todos os ensaios ajustando a curva polinomial ao grau mais adequado. O valor de  $R$  variou entre 0,96282 e 0,99817.

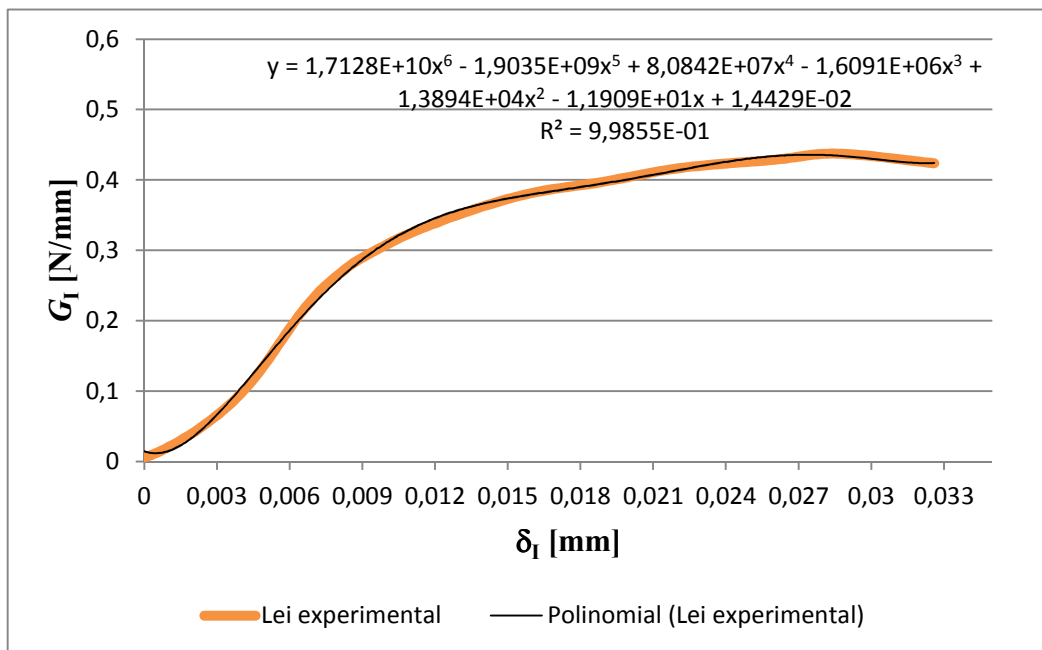


Figura 74: Lei  $G_I$ - $\delta_I$  experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015 e ajuste de curva polinomial.

A **tabela 11** resume os valores de  $G_{Ic}$  (N/mm) dos ensaios realizados aos provetes colados com o adesivo Araldite® 2015. Para este adesivo constata-se uma repetibilidade muito boa entre provetes, pelo que não se descarta nenhum resultado.

Tabela 11 – Valores de  $G_{Ic}$  (em N/mm) pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® 2015.

Proвете	CBBM N/mm	CCM N/mm	CBT N/mm	Integral-J N/mm
A2_1	0,444	0,403	0,431	0,437
A2_2	0,467	0,387	0,484	0,434
A2_3	0,492	0,576	0,484	0,494
A2_4	0,460	0,399	0,471	0,456
A2_5	0,709	0,590	0,676	0,665
A2_6	0,663	0,619	0,632	0,712
Média	0,539	0,496	0,530	0,533
Desvio Padrão	0,116	0,110	0,099	0,123

Para cada provete a concordância entre os quatro métodos é bastante boa, excepto em casos pontuais para o CCM, o que é explicado por algumas dificuldades na determinação do polinómio de ajuste a  $C^{1/3}=f(a)$  (34). Entre métodos a correspondência de valores também é excelente. Para o CBBM os resultados deram  $G_{Ic}=0,539\pm0,116$  N/mm, para o CCM,  $G_{Ic}=0,496\pm0,110$  N/mm, para o CBT,  $G_{Ic}=0,530\pm0,099$  N/mm, e para o integral- $J$ ,  $G_{Ic}=0,553\pm0,123$  N/mm. O adesivo Araldite® 2015 está estudado em diversa literatura. No estudo de Campilho et al.(69) obteve-se o valor de  $G_{Ic}=0,43\pm0,02$  N/mm para substratos de compósito unidireccional 0° de fibra carbono/epóxico. Também da Silva et al.(70), no seu estudo, obteve  $G_{Ic}=0,5257\pm0,0808$  N/mm para substratos de aço (DIN St33).

### 3.4.7.2 Determinação da lei coesiva em tracção

A curva da lei coesiva em tracção  $\sigma_I$ - $\delta_I$ , obtida experimentalmente **afigura 75** mostra, após ser atingido o valor máximo de  $\sigma_I$ , as características de ductilidade do adesivo Araldite® 2015. No ensaio deste provete, foram obtidos valores de  $\sigma_I=34,75$  MPa e  $\delta_I=0,0108$  mm.

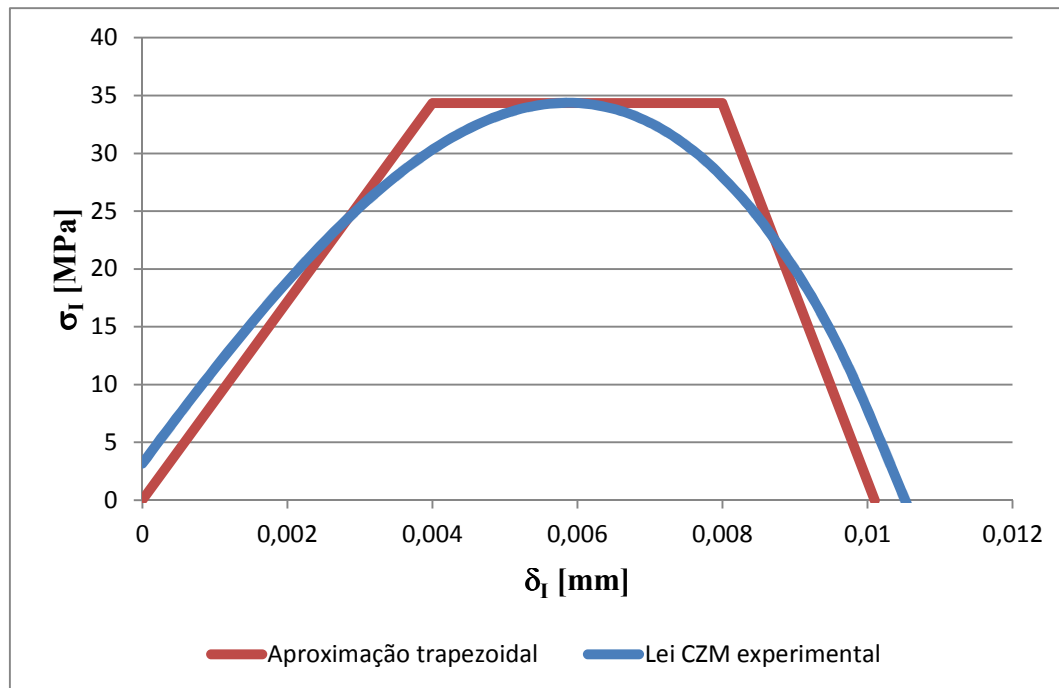


Figura 75: Lei  $\sigma_I$ - $\delta_I$  experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® 2015 e aproximação trapezoidal.

Podemos concluir que a lei CZM trapezoidal para o adesivo Araldite® 2015 proposta e apresentada na **figura 75**, é particularmente adequada, dado representar com precisão a ductilidade adesiva.

### 3.4.8 Adesivo Araldite® AV138

Na **figura 76** encontram-se reunidas todas as curvas força vs. deslocamentos ( $P$ - $\delta$ ), obtidas para os seis ensaios realizados com adesivo Araldite® AV138, após concluídos os ensaios dos provetes e respectivo tratamento dos dados. De uma forma geral, constata-se que todas as curvas  $P$ - $\delta$  apresentam o mesmo comportamento, com exceção da AV\_1 e AV\_4. Os dois provetes referidos apresentam quebras abruptas de  $P$  durante a propagação da fenda, representativos de propagação instável da fenda. No entanto, como estes provetes apresentam também zonas de propagação estável e boa repetibilidade no que diz respeito ao comportamento geral e valores de  $G_{Ic}$  obtidos, estes provetes são incluídos na análise de  $G_{Ic}$  que se segue.

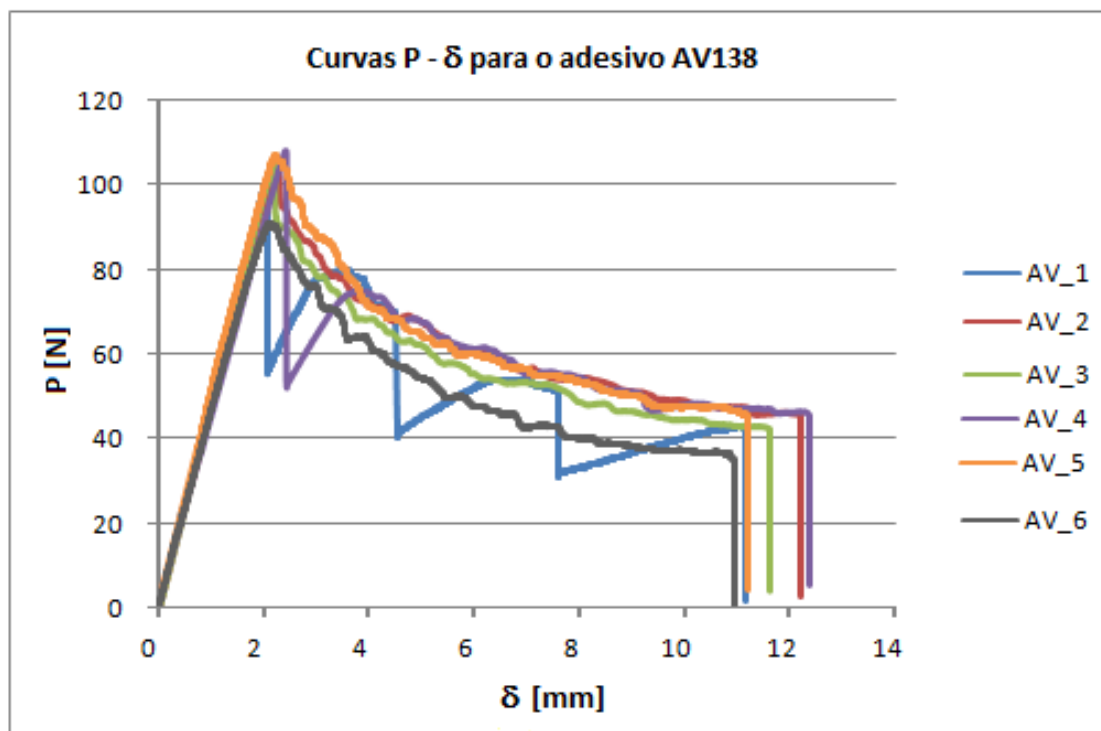


Figura 76: Evolução das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138.

Tal como os adesivos anteriores, nas curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138 estão apresentadas três fases distintas. Na primeira fase, temos um comportamento assumidamente reversível, ou seja regime elástico em que a evolução da força/deslocamento é linear. Na segunda fase, correspondente à ocorrência de um processo irreversível no adesivo (formação da ZPF), observa-se uma perda de linearidade um pouco antes da carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ). A energia armazenada do provete atinge o seu valor crítico,  $G_{\text{Ic}}$ , na vizinhança de  $P_{\text{máx}}$ , correspondente ao início de propagação da pré-fenda. A terceira fase ocorre após ser alcançado  $P_{\text{máx}}$ , e corresponde à fase de propagação estável da fenda em que a força aplicada diminui progressivamente. No final há uma quebra abrupta, motivada pela ruptura total do provete.

Durante o período de propagação a curva  $P-\delta$  apresenta pequenas ondulações. A justificação para a ocorrência deste fenómeno é o aparecimento de micro-fendas sucessivas que se propagam apenas a uma curta distância, originando uma ligeira diminuição da força. Subsequentemente ao aparecimento da nova micro-fenda ocorre um gradual aumento da força, e assim sucessivamente, até à rotura total do provete. Os provetes AV\_1 e AV\_4 tiveram comportamento instável à propagação da fenda, com quebras abruptas de  $P$  durante a propagação.

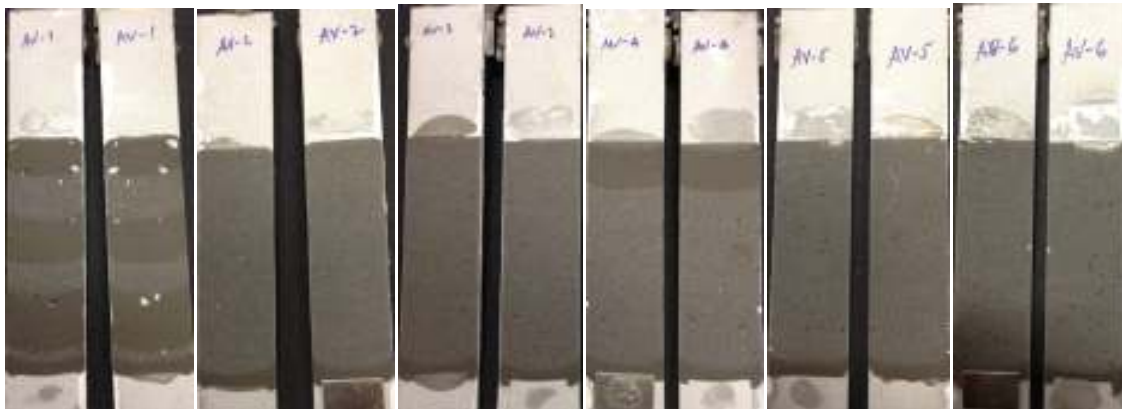


Figura 77: Superfícies de rotura do adesivo Araldite® AV138.

A **figura 77** permite identificar o tipo de rotura para este adesivo. Em todos os provetes ocorreu rotura coesiva pelo adesivo, podendo mesmo considerar-se que a propagação ocorreu próximo do plano médio do provete. O facto de a rotura ter sido coesiva demonstra



a excelente adesão entre adesivo e substrato. Nas superfícies de rotura dos provetes AV\_1 e AV\_4 existem duas zonas com tonalidades claramente diferentes. As zonas com tonalidade mais escura corresponde à fractura frágil patente nas curvas  $P$ - $\delta$  respectivas.

Na **tabela 12** estão registados os valores de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta_{P\text{máx}}$ ,  $\delta_{\text{máx}}$ ,  $E_{P\text{máx}}$  e  $E_{\delta\text{máx}}$ . O cálculo das energias foi realizado como descrito para o adesivo Sikaforce® 7888. Pode-se concluir pela análise dos dados da tabela que existe uma boa repetibilidade entre todos os resultados obtidos no ensaio dos provetes.

Tabela 12 – Valores de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta_{P\text{máx}}$ ,  $\delta_{\text{máx}}$ ,  $E_{P\text{máx}}$  e  $E_{\delta\text{máx}}$  para o adesivo Araldite® AV138.

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{P\text{máx}}$ [mm]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$E_{P\text{máx}}$ [J]	$E_{\delta\text{máx}}$ [J]
AV_1	101,56	2,05	11,12	0,10	0,56
AV_2	106,19	2,23	12,16	0,11	0,75
AV_3	105,19	2,17	11,61	0,10	0,63
AV_4	108,05	2,43	12,37	0,11	0,68
AV_5	107,19	1,49	11,19	0,17	0,66
AV_6	90,93	2,12	10,93	0,06	0,55
Média	103,19	2,08	11,57	0,13	0,63
Desvio Padrão	6,41	0,31	0,59	0,01	0,06

Em função da repetibilidade dos resultados obtidos entre provetes, estes são todos considerados na análise. Obtiveram-se os seguintes valores médios:  $P_{\text{máx}}=103,19\pm6,41$  N,  $\delta_{P\text{máx}}=2,088\pm0,317$  mm,  $\delta_{\text{máx}}=11,570\pm0,592$  mm,  $E_{P\text{máx}}=0,1023\pm0,0195$  J e  $E_{\delta\text{máx}}=0,6363\pm0,0341$  J.

#### 3.4.8.1 Determinação do $G_{Ic}$

A **figura 78** mostra as curvas- $R$  pelo CCM, CBT e CBBM. A curva- $R$  relaciona a evolução de  $G_{Ic}$  para um provete representativo dos seis ensaios realizados com adesivo Araldite® AV138.

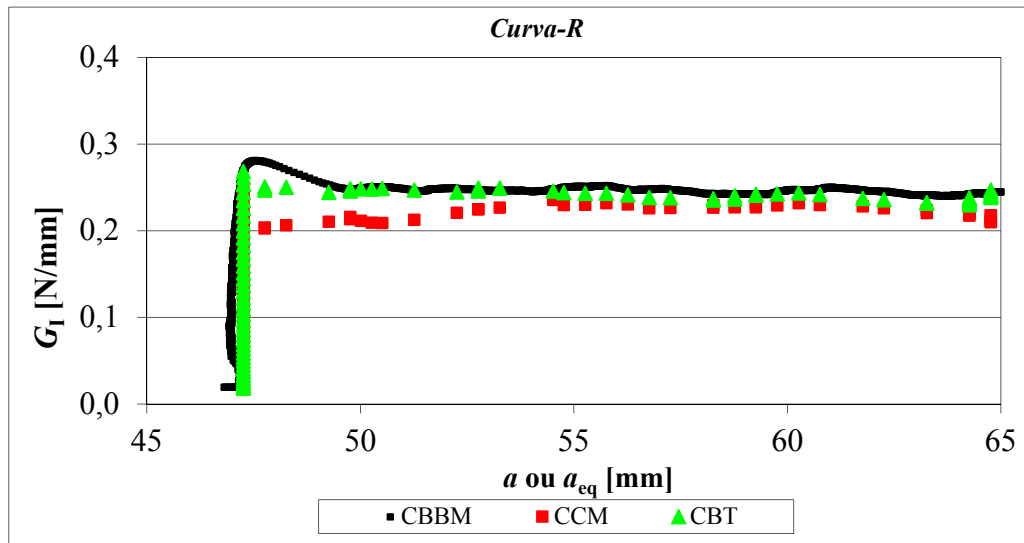


Figura 78: Curvas- $R$  determinadas experimentalmente por métodos diferentes no ensaio DCB de um provete com adesivo Araldite® AV138.

Podemos observar que os três métodos prevêem a propagação do dano a um valor constante de  $G_I$  ao longo de um comprimento de propagação de 25 mm, sendo  $G_{Ic}$  o valor de patamar das curvas.

O método óptico obriga que inicialmente, através da técnica descrita em 3.4.3.3, e para cada ensaio em função do tempo decorrido desde o início do ensaio, seja estimado  $\theta_0$ . Este parâmetro é necessário para a determinação do  $G_{Ic}$ . A figura 79 mostra a evolução de  $\theta_0$  para um ensaio específico de uma amostra. Na referida figura está representada a curva primitiva, a curva polinomial do quarto grau para redução do ruído e a curva ajustada, adoptando  $\theta_0=0$  no início do ensaio. Para cada um dos ensaios realizados foi seleccionado, entre o polinómio de segundo a sexto grau, o grau mais adequado à curva primitiva, sendo escolhido o melhor factor de correlação ( $R$ ). Para os ensaios efectuados,  $R$  variou entre 0,81251 e 0,98263. O ajustamento à curva polinomial tem como finalidade anular o efeito do eventual desalinhamento inicial entre as escalas coladas nos aderentes, cujas marcas foram usadas para estimar  $\theta_0$ .

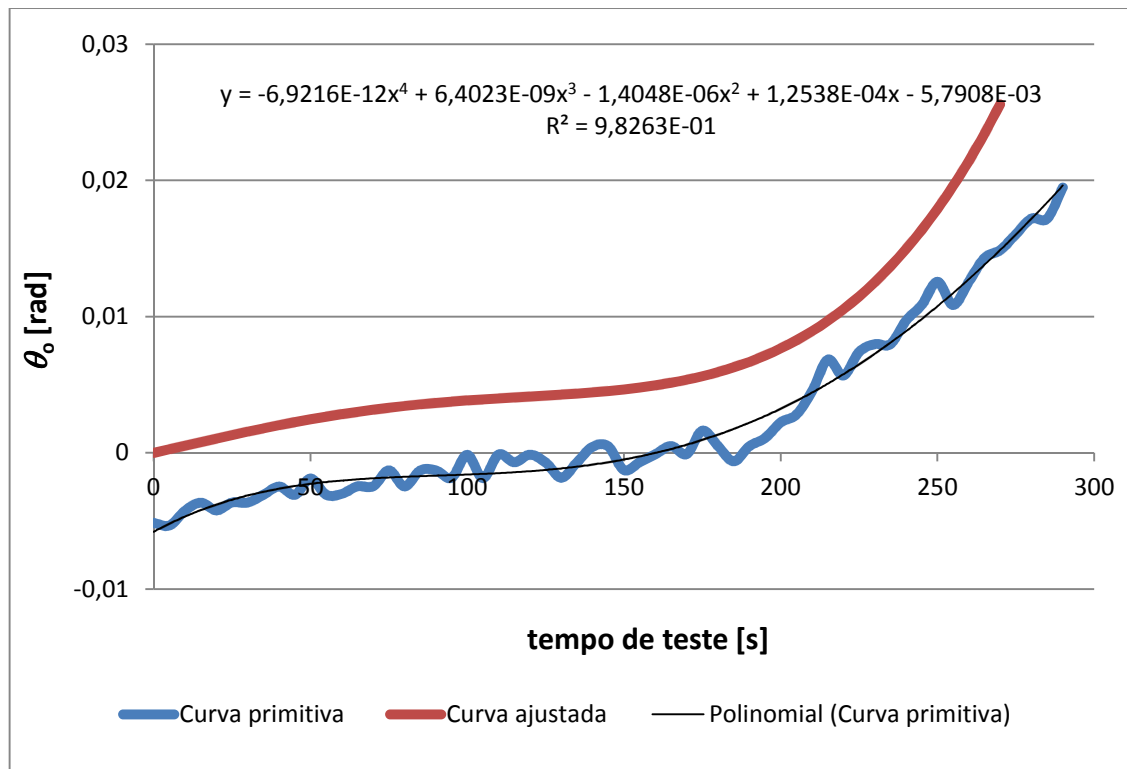


Figura 79: Evolução de  $\theta_0$  no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

A **figura 80** mostra a evolução de  $\delta_i$  para um ensaio específico de uma amostra. O valor de  $\delta_i$  é determinado, utilizando a técnica descrita em 3.4.3.2, para cada provete ensaiado. Para que  $\delta_i=0$  coincida com o zero do tempo de teste foi necessário realizar um ajuste final. Na **figura 80** está representada a curva primitiva a partir das medições ópticas, a curva polinomial ajustada ao quarto grau e a curva ajustada. Foi escolhido o melhor factor de correlação ( $R$ ) entre o polinómio de segundo a sexto grau ajustado à curva primitiva para cada provete ensaiado. O valor de  $R$  variou entre 0,78523 e 0,95106.

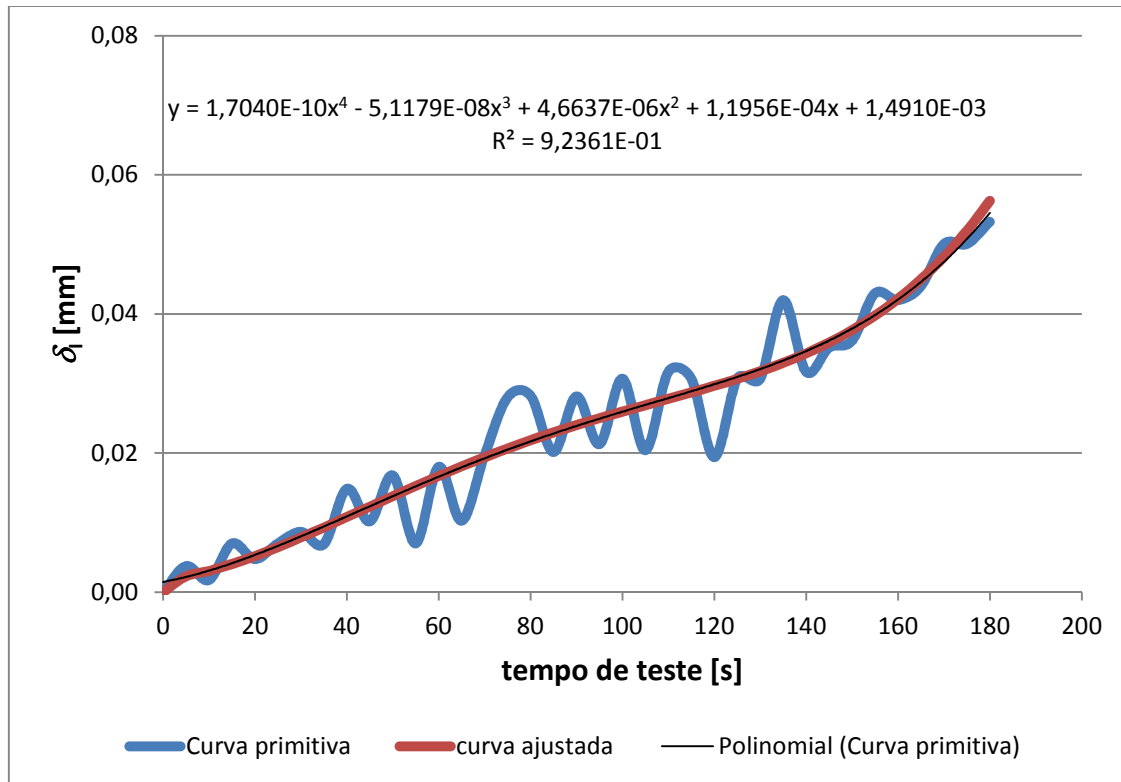


Figura 80: Evolução de  $\delta_l$  no ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138: curva primitiva obtida a partir do método óptico, ajuste de curva polinomial e curva polinomial ajustada.

Os valores de  $G_{lc}$  para as amostras foram definidos através da representação gráfica das curvas de  $G_{lc}$ - $\delta_l$ . A **figura 81** mostra a curva da lei experimental  $G_{lc}$ - $\delta_l$  e a curva polinomial correspondente ajustada ao sexto grau. No início do ensaio,  $G_{lc}$  aumenta lentamente com  $\delta_l$ , mas a taxa de crescimento de  $G_{lc}$  aumenta rapidamente entre  $\delta_l=0,01$  e  $0,0375$  mm, sendo o seu valor estacionário alcançado aproximadamente para  $\delta_l=0,04$  mm. Para este ensaio, o valor medido de  $G_{lc}$  é de  $0,252$  N/mm. A lei experimental de  $G_{lc}$ - $\delta_l$  foi representada de forma semelhante para todos os ensaios ajustando a curva polinomial ao grau mais preciso ( $R$  variou entre  $0,96346$  e  $0,99941$ ).

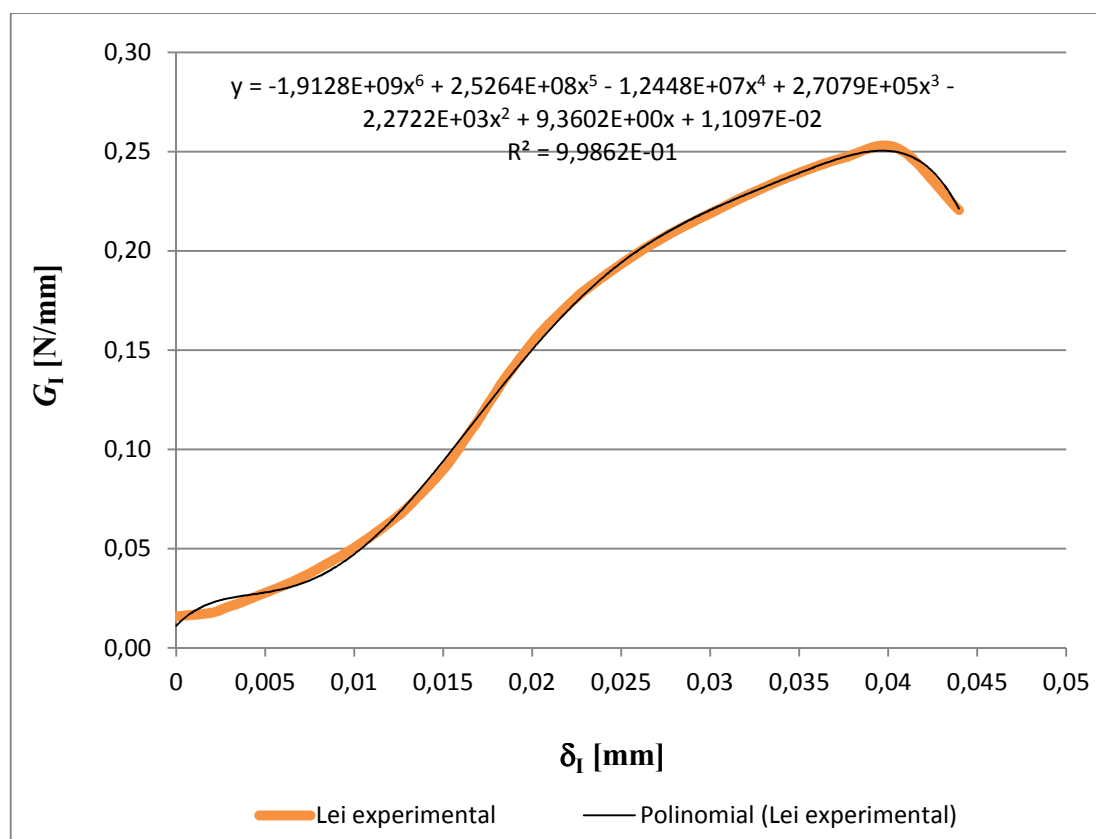


Figura 81: Lei  $G_{Ic}$ - $\delta_I$  experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138 e ajuste de curva polinomial.

Tabela 13 – Valores de  $G_{Ic}$  (em N/mm) pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® AV138.

Provete	CBBM N/mm	CCM N/mm	CBT N/mm	Integral-J N/mm
AV_1	0,231	0,200	0,237	0,224
AV_2	0,247	0,219	0,241	0,252
AV_3	0,234	0,193	0,215	0,231
AV_4	0,310	--	0,291	0,329
AV_5	0,254	0,189	0,237	0,237
AV_6	0,217	0,195	0,206	0,197
Média	0,249	0,199	0,238	0,245
Desvio Padrão	0,033	0,012	0,030	0,045

A **tabela 13** representa o sumário dos valores de  $G_{Ic}$  (N/mm) obtidos por todos os métodos. Os resultados da **tabela 13**, em conjunto com os dados apresentados anteriormente, mostram que a coerência entre provetes é excelente. Desta forma, os resultados dos seis provetes são considerados na análise. De igual forma ao adesivo Sikaforce® 7888 houve um provete (AV\_4) para o qual não se conseguiu obter resultado satisfatório com o CCM. Para além disso o valor médio de  $G_{Ic}$  com o CCM é ligeiramente inferior aos outros métodos, o que se considera estar relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ . Os restantes três métodos apresentam resultados médios muito similares, e também comparando cada provete individualmente. Começando pelo CBBM, obteve-se  $G_{Ic}=0,249\pm0,033$  N/mm, para o CCM,  $G_{Ic}=0,199\pm0,012$  N/mm, para o CBT,  $G_{Ic}=0,238\pm0,030$  N/mm, e para o integral- $J$ ,  $G_{Ic}=0,245\pm0,045$  N/mm. Comparando com resultados na literatura de da Silva et al.(70), obteve-se  $G_{Ic}=0,3459\pm0,0478$  para substratos de aço (DIN St33).

#### 3.4.8.2 Determinação da lei coesiva em tracção

Na **figura 82** temos representadas a curva da lei  $\sigma_1$ - $\delta_1$  obtida experimentalmente para um provete e as leis CZM trapezoidal e triangular propostas para o adesivo Araldite® AV138.

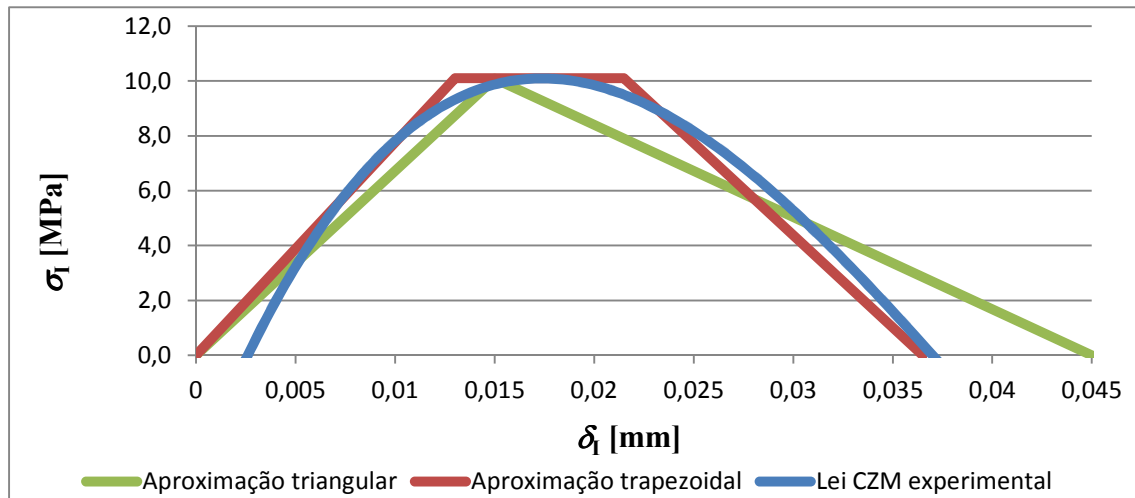


Figura 82: Lei  $\sigma_1$ - $\delta_1$  experimental de ensaio de um provete com adesivo Araldite® AV138, e aproximação trapezoidal e triangular.

Pela representação gráfica da figura, tanto a lei CZM trapezoidal como a lei CZM triangular representam com elevada aproximação as características do adesivo. Sendo este adesivo frágil, ao contrário dos adesivos anteriores, a lei triangular também se revela adequada. Experimentalmente, para este provete, foram encontrados os seguintes valores:  $\sigma_I = 10,02$  MPa e  $\delta_I = 0,0375$  mm (para a lei trapezoidal).

### 3.5 Comparação dos diferentes adesivos estudados

Dos valores de  $G_{Ic}$  obtidos nos ensaios para o adesivo SikaForce® 7888 resumidos na **tabela 9**, foram traçados os gráficos de linhas conforme representados na **figura 83**. Não foi possível determinar o valor de  $G_{Ic}$  para o provete SF\_1 pelo método CCM.

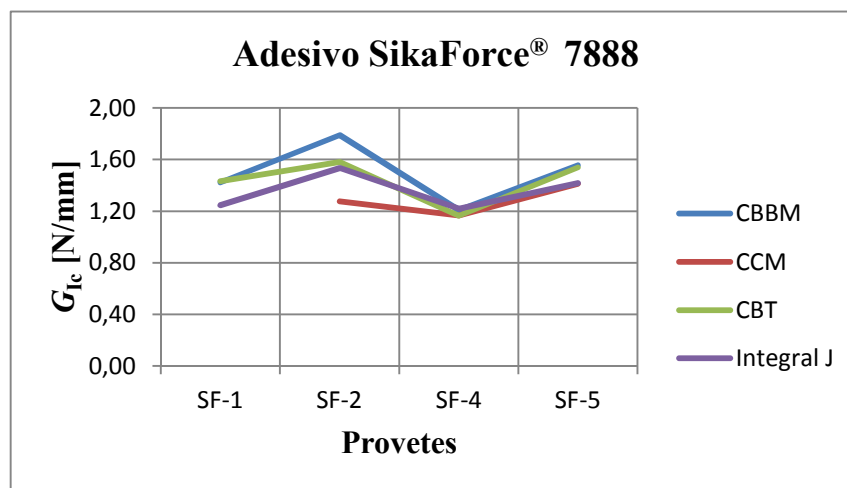


Figura 83: Tendência de  $G_{Ic}$  do adesivo SikaForce® 7888 pelos vários métodos.

Pela análise da **figura 83** verifica-se que os valores encontrados de  $G_{Ic}$  pelos diferentes métodos seguem a mesma tendência, sendo no provete SF\_4 que estes estão em mais concordância. Na **figura 84** está representada graficamente a média dos valores obtidos de  $G_{Ic}$  para o adesivo SikaForce® 7888 pelos vários métodos. Pela sua análise verifica-se que o método CCM é o que tem a média mais baixa, o que se considera estar relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3} = f(a)$ .

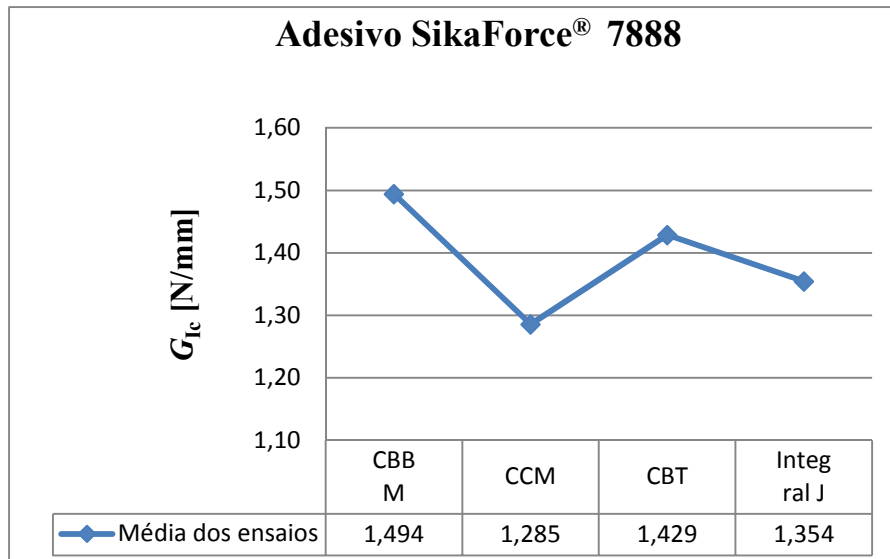


Figura 84: Média do valor de  $G_{Ic}$  do adesivo SikaForce® 7888 pelos vários métodos.

Dos valores resumidos na **tabela 11** para o adesivo Araldite® 2015 de  $G_{Ic}$ , foram traçados os gráficos de linhas conforme representados na **figura 85**.

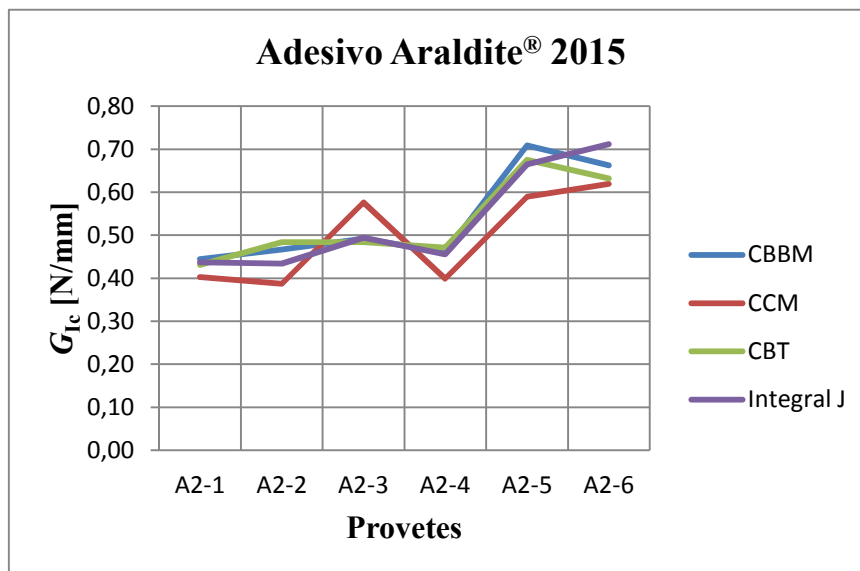


Figura 85: Tendência de  $G_{Ic}$  do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.

Da análise da **figura 85** podemos concluir que há correspondência entre todos os métodos dos valores encontrados de  $G_{Ic}$ . O provete A2\_1 é o que está em mais concordância entre



todos os métodos. O provete A2\_3, com exceção do método CCM, é o que tem maior concordância entre métodos. A **figura 86** representa graficamente para o adesivo Araldite® 2015 a média dos valores obtidos de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos. Também para este adesivo se verifica que foi pelo método CCM que a média obtida é mais baixa, o que também se considera estar relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ .

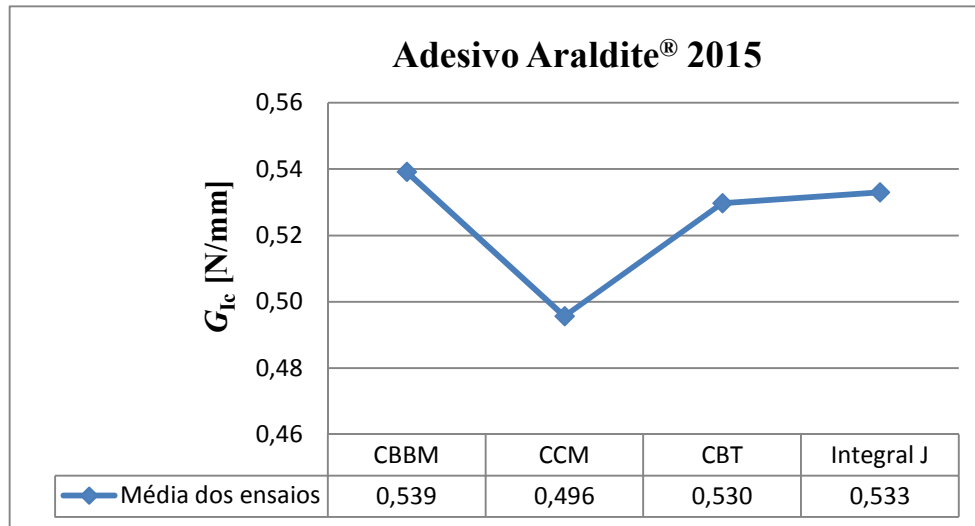


Figura 86: Média do valor de  $G_{Ic}$  do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.

Para o adesivo Araldite® AV138 foram traçados os gráficos de linhas dos valores resumidos na **tabela 13** de  $G_{Ic}$ , conforme mostrados na **figura 87**.

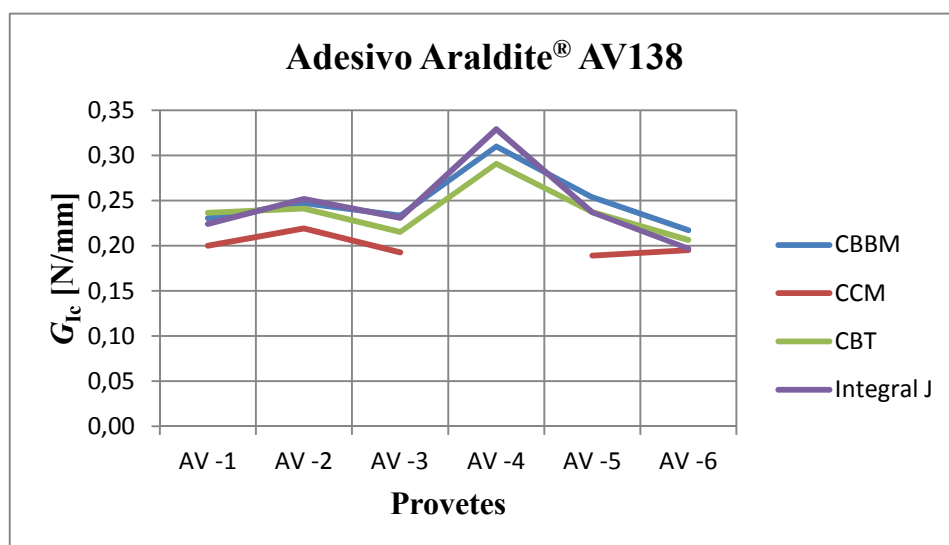


Figura 87: Tendência de  $G_{Ic}$  do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos.

Tal como para os adesivos anteriores, pela **figura 87** verifica-se que o valor de  $G_{Ic}$  segue a mesma tendência relativa para todos os métodos. Os valores do provete AV\_6 são os que têm maior concordância entre os quatro métodos. Para o provete AV\_4 não foi possível encontrar o valor pelo método CCM. Na **figura 88** está representada graficamente a média dos valores obtidos de  $G_{Ic}$  pelos quatro métodos para o adesivo Araldite® 2015.

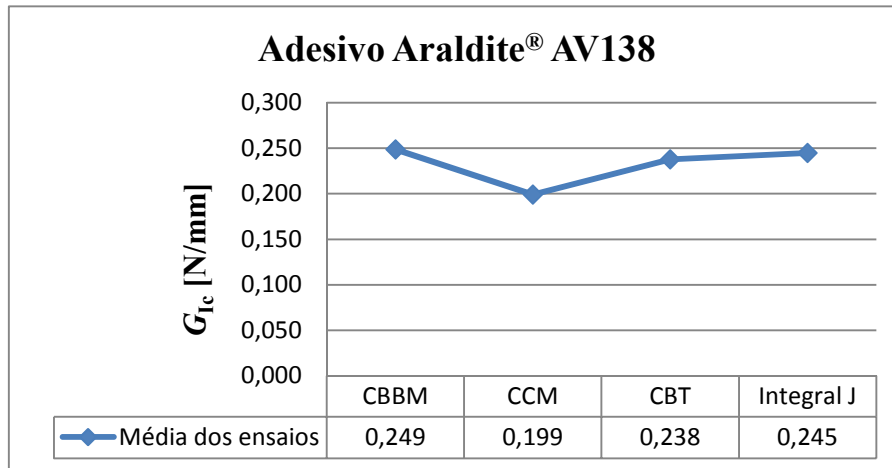


Figura 88: Média do valor de  $G_{Ic}$  do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos.

Tal como nos adesivos anteriores, neste adesivo a média obtida pelo método CCM também é mais baixa, o que também está relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ .

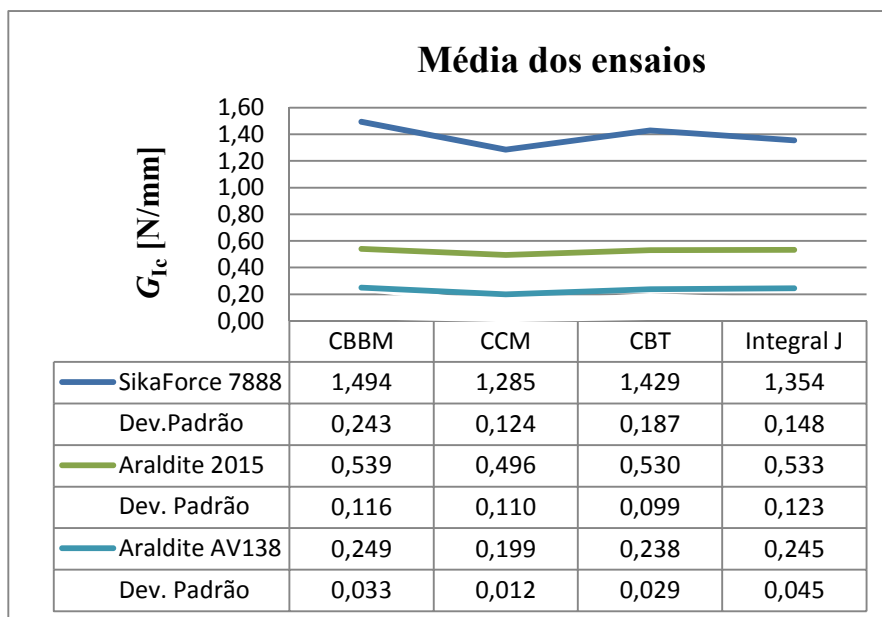


Figura 89: Média do valor de  $G_{Ic}$  encontrado pelos quatro métodos para os três adesivos.

Na **figura 89** podemos ver os gráficos dos valores médios encontrados de  $G_{Ic}$ , pelos quatro métodos e para os adesivos três estudados. Dos resultados obtidos para os três adesivos estudados observa-se que o SikaForce® 7888 é o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Como é sabido, as propriedades dos adesivos influenciam altamente a resistência da junta. No entanto, um adesivo mais forte não significa necessariamente ter uma resistência superior na junta. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta. Como resultado, a tensão de corte média de ruptura é muito baixa. Este é o comportamento expectável do Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo têm geralmente uma resistência baixa. No entanto, eles são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica (devido à baixa rigidez), o que torna as juntas muito mais resistentes do que com os adesivos mais resistentes e frágeis (71). Enquadra-se nesta categoria o Araldite® 2015, que apresenta uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tracção e corte inferiores ao Araldite® AV138.

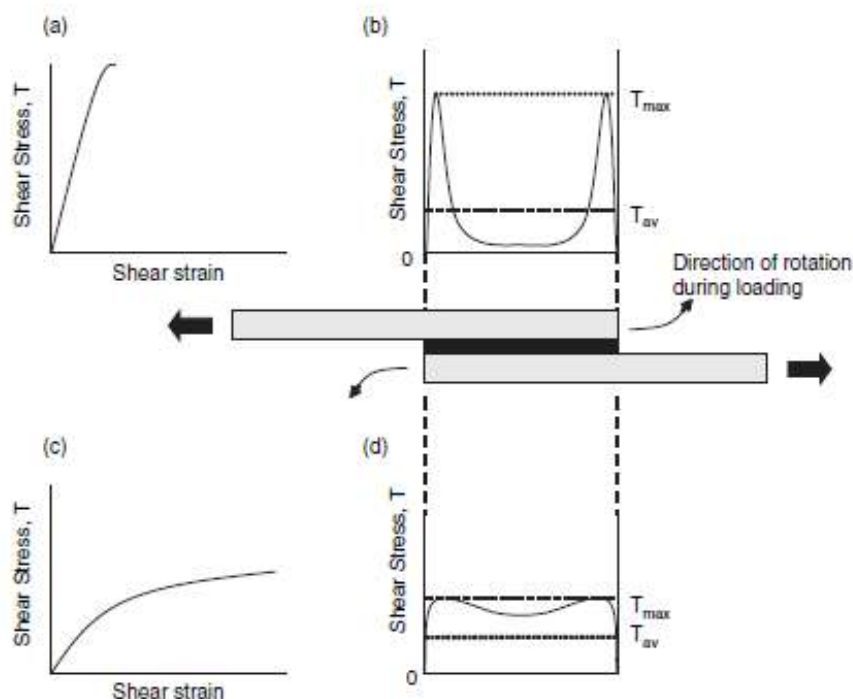


Figura 90: Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (71).

Pela **figura 90** podemos verificar que para adesivos frágeis, com uma curva típica tensão vs. deformação como indicado em (a), a rotura dá-se quando as tensões máximas nas extremidades da sobreposição atingem os valores limites do adesivo(b). Em adesivos dúcteis, com uma curva típica de tensão vs. deformação como mostrado em (c), a rotura tem lugar após plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição e aumento das tensões de corte na região intermédia (d), o que permite uma tensão de corte média superior no adesivo e uma resistência global da junta superior.

A flexibilidade do adesivo mais dúctil permite à junta acomodar mais facilmente o movimento dos aderentes durante o carregamento; a tensão é então distribuída ao longo de uma área maior. Ora adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda enquanto os dúcteis resistem mais à sua propagação, o que se reflecte numa maior resistência(72). O SikaForce® 7888, uma vez que combina elevada resistência com grande ductilidade, está em vantagem comparativamente aos anteriores no que concerne à aplicação em juntas adesivas, pois atinge tensões de corte elevadas na junta e apresenta uma capacidade superior de redistribuição de tensões na camada de adesivo após o seu limite elástico ser atingido. Por outro lado, a resistência à fadiga de juntas coladas é tipicamente menor para adesivos frágeis. Esta diferença é justificada pela distribuição de tensões mais uniformes e maior energia de amortecimento dos adesivos dúcteis(8). Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras (73). Os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí a preferência do seu uso para unir chapas finas (74).

## 4 Conclusões

Este trabalho teve como objectivo testar um método óptico para a medição de  $G_{Ic}$  para três adesivos, em ensaio DCB (modo I), e aferir as suas potencialidades e precisão por comparação com métodos tradicionais. O  $G_{Ic}$  para todos os adesivos foi calculado por meio de técnicas convencionais de caracterização de fractura, como o CCM, CBT e CBBM, e através do integral- $J$ . Pela metodologia do integral- $J$ , foi necessária uma abordagem relativamente morosa que envolve um método óptico para estimar os parâmetros  $\theta_0$  e  $\delta_1$  para cada ensaio, em função do tempo decorrido desde o início do ensaio seguido de ajuste polinomial, para que  $\theta_0=0$  e  $\delta_1=0$  coincidam com o zero do tempo de teste. A correlação entre todos os métodos de obtenção de  $G_{Ic}$  para os três adesivos foi consistente, apesar de existirem ligeiras diferenças entre os valores obtidos.

Para o adesivo Sikaforce® 7888, o valor médio obtido pelo CBBM foi de  $1,494 \pm 0,243$  N/mm. Foram obtidas diferenças de -4,40% para o CBT, -9,37% para o integral- $J$ , e -13,98% para o CCM.

Para o adesivo Araldite® 2015, a média dos valores obtidos pelo CBBM foi de  $0,539 \pm 0,116$  N/mm. Foram obtidas diferenças de -1,76% para o CBT, -1,15% para o integral- $J$ , e -8,08% para o CCM.

Para o adesivo Araldite® AV138, a média dos valores obtidos pelo CBBM foi de  $0,249 \pm 0,033$  N/mm. Foram obtidas diferenças de -4,29% para o CBT, -1,46% para o integral- $J$ , e -19,86% para o CCM.

De uma forma geral, pode-se afirmar que o  $G_{Ic}$  obtido através do integral- $J$  para os três adesivos estudados seguiu a mesma tendência dos outros métodos. O adesivo Araldite® 2015 foi o que teve a maior correlação entre todos os métodos, e o adesivo

Araldite® AV138 a menor. Para todos os adesivos, o método que teve o maior desvio foi o CCM. Este facto poderá estar relacionado com o ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ .

A lei CZM dos adesivos foi obtida pelo método directo, como complemento à obtenção de  $G_{Ic}$  pelo método do integral- $J$ , tendo em conta a curva  $G_{Ic}-\delta_I$  disponível. Pela sua diferenciação foi obtida a lei  $\sigma_I-\delta_I$  (ou CZM). As aproximações simplificadas trapezoidais às leis CZM dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, e a aproximação simplificada triangular no caso do adesivo Araldite® AV138, mostraram que estas reproduzem o comportamento experimental com um nível razoável de precisão, tornando assim fácil a sua implementação pelo Método de Elementos Finitos.

Efectuando a comparação dos diferentes métodos de  $G_{Ic}$ , para a obtenção de  $G_{Ic}$  através dos métodos CBBM e CBT foi necessário analisar visualmente em média 100 imagens por cada ensaio para efectuar a medição do comprimento de fenda. Este processo de análise torna-se moroso pela dificuldade de visualização da propagação da fenda. A maior dificuldade para a obtenção de  $G_{Ic}$  através do método CCM foi no ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$ . A obtenção de  $G_{Ic}$  pelo integral- $J$  e após a análise por CDI das imagens de cada um dos ensaios para posterior determinação dos parâmetros  $\delta_I$  e  $\theta_0$ , é um processo relativamente moroso e com alguma complexidade. Torna-se necessário que, para cada ensaio,  $\theta_0=0$  e  $\delta_I=0$  coincidam com o zero do tempo de teste, e realizar o ajuste polinomial mais adequado à curva primitiva para determinação da curva ajustada. Determinada a curva ajustada com os valores dos parâmetros  $\delta_I$  e  $\theta_0$  ajustados é então determinado o valor de  $G_{Ic}$ . A obtenção da lei coesiva é bastante sensível a pequenos desvios  $\delta_I$ , pelo que o método a utilizar deve ter boa resolução para captar este parâmetro.

Como trabalhos futuros sugere-se a obtenção de fotos de 2 em 2 segundos para minimizar o efeito do ruído nas curvas primitivas, assim como um melhor ajuste polinomial de  $C^{1/3}=f(a)$  no método CCM. Refere-se também a validação dos valores de  $G_{Ic}$  numericamente pela replicação numérica dos ensaios e o teste das leis coesivas obtidas pelo integral- $J$  em junta adesiva para aferição dos resultados obtidos.

## Referências

1. **Pinto, A.M.G.** *Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos*. Tese de Doutoramento : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
2. **da Silva, L.F.M. e de Magalhães, A.G., e de Moura M.F.S.F.** *Juntas Adesivas Estruturais*. Publindústria : s.n., 2007.
3. **Cognard, P. (Series Editor).** *Handbook of Adhesives and Sealants VI*. France : ELSEVIER, 2005.
4. **Pereira, A.M.B.** *Fratura de Juntas Coladas*. Tese de Mestrado : Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2002.
5. **Teixeira, L.M.B.S.** *Caraterísticas do comportamento Mecânico de Juntas de sobreposição Simples Coladas com adesivos Estruturais*. Tese de Mestrado : Faculdade de engenharia do Porto, 2000.
6. **Madrid, M., Martínez, J.M.M., Martín, F.L., Vega, M.M.** *Tecnología de la Adhesión*. España : Departamento Técnico de Loctite, 1997.
7. **Oñoro, J.** *Adesivos, El reto de unir todo con todo*. Dpto. Ingenireia y Ciencia de los Materales : ETSI Industriales. UPM, Espanha.
8. **Petrie, E.W.** *Handbook of Adhesives and Sealents 2nd ed.*. New York, N.Y : McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-049888-1.
9. **Quini, J.G.** *Adesivos Estruturais Aplicados a Combinações de Compósitos, Plasticos e Metais*. Tese de Doutoramento em Tecnologia Nuclear : Instituto de Pesquisa Energética e Nuclear, Universidade de São Paulo, 2011.
10. **Pereira, A.B., de Moraes, A.B.** *Influencia das tensões de Bordo na Resistncia de Juntas Colada de Sobreposição*. Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica : Vol.8, Nº3, pp 69-79, 2004.
11. **Campilho, R.D.S.G.** *Modelação da Execução de Reparação em Materiais Compósitos*. tese de Mestrado : Faculdade de engenharia do Porto, 2005.
12. **D5573-99, ASTM.** *Standard Pratrice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. s.l. : ASTM, 1999.
13. **Packham, D.E.** *Handbook of Adhesion 2nd Edition*. England : John wiley & Sons, Ltd, 2005.
14. **Pinto, A.G., Magalhães, A.G., Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F, Baptista, A.P.M.** *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. International Jdhesisournal of Adhesion & A : pp 351-376, 2009.
15. **Gonçalves, J.P.M., de Moura, M.F.S.F., de Castro, P.M.S.T.** *A three-dimension finit element model for stress analysis of adhesives joints*. internatuonal Journao of Adhesion & Adhesives : 22: pp 357-365, 2002.
16. **Owens, J.F.P.** *Studies on Stiffness and Fracture Behaviour in Adhesively Bonded Composite-to-Metal Sear Joints*. A Thesis Master of Science in Engineering : University of New Brunswinck, 1998.

17. **Das, M, D.R., Madenci, E., Ambur, D.R.** *Tree-Dimensional Nonlinear Analyses of Scarf Repa in Composite Laminates and Sandwich Panels*. Journal of Machanics of Materials and Strutures : pp 1641-1658, 2008.
18. **Army - MR, Navy - AS, Air Force - 11.** *Composite Materials Handboock, Vol 3: Polymer Matrix Composites Materials Usage, Ddesign, and Analysis*. Department of Defense, United States of America : MIL - HDB-17-3F, 2013.
19. **Ebnesajjad, Edited by Sina.** *Adhesives Technology Handboock*. 2nd Edition : William Andrew, 2008.
20. **Montes, J.R., Lucas, C.M., Romero, J.C.R.** *Procesos industriales para materiales no metálicos*. 2ª Edición, Madrid España : Edutirial Vision Net.
21. **Esteves, J.L.S.** *Estudo do Comportamento de adesivos Estruturais*. Tese de Mestrado : Faculdade da Universidade do Porto, 1990.
22. **de Moraes, M.f.S.F., de Moura, A.B., e de Magalhães, A.G.** *Materiais Compositos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. s.l. : Publinústria, 2005.
23. **Kricheldorf, H.R., Nuyken, O., Swift, G.,.** *Handbook of Polymer Synthesis 2nd Edition*. New York : Marcel Dekker, 2000.
24. **da Silva, B.B.R.** *Dsenvolvimento de Adesivos de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona*. Tese de Mestrado : Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
25. **Kumar, A., Gupta, R.K.** *Fundamentals of Polymer Engineering 2nd Edition*. New York : Marcel Dekker, 2003.
26. **Pereira, A.M.B.** *Fractura interlaminar de compósitos de matriz polimérica*. Tese de Doutoramento : Departamento de Engenharia Mecânica da universidade de Aveiro, 2006.
27. **Griffth, A.A.** *The Phenomena of rupture and Flow in Solids* . Philosophical Transactions of the Royal Society of London : Containing Papers of a Mathematical or Physical Character pp 263-198, 1921.
28. **Orowa, E.** *Theory of the fatigue of metals*. Physics Department, University of Birmingham : Royal Society of London, A Mathematical and Physical Sciences: pp 79-105, 1938.
29. **Irwin, G.R.** *Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate*. s.l. : Journal for Applied Mechanics: pp 361-364, 1957.
30. **Arana, J.L., Gonzá, J.J.** *Mecánica de Fractura*. Universidad del País Vasco : Servicio Editorial.
31. **Westegaard, H.M.** *Bearing pressures and crack*. s.l. : Journal for Applied Mechanics: pp 49-53, 1937.
32. **Irwin, G.R.** *Plastic zone near a crack and fracture toughness*. ASTIA : Mechanical and Metallurgical Behavior of Sheel Materials: pp 63-70, 1960.
33. **Broek, D.** *Elementary engineering fracture mechanics*. s.l. : Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
34. **de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G., Gonçalves, J.P.M.** *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. s.l. : Composites Science and Techonogy: 68: pp 2224 - 2230, 2008.
35. **Esteves, V.H.C.** *Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de Modo Misto (I+II)*. Tese de Mestrado : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.



36. **de Moura, M.F.S.F.** *Interlaminar Mode II Fracture Characterization*. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial : Faculdade de Engenharia do Porto.
37. **Carlsson, L.A., Gillespie, J.W., Pipes, R.B.** *On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing*. s.l. : Journal of Composite Materials: 20, pp 594 - 604, 1986.
38. **Wang, H., Vu-Khanh, T.** *Uso de teste fim-carregados-split (ELS) para estudar o comportamento de fratura estável de compósitos em modo II de carregamento*. s.l. : Elsevier Ltd.; Composite Structures: 36, pp 71 - 79, 1996.
39. **Martin, R.H., Davidson, B.D.** *Mode II fracture toughness evaluation using four point bend, end notched flexure test*. s.l. : Plastics, Rubber and Composites, 28: pp. 401 - 406, 1999.
40. **Cotterell, B., Rice, J.R.** *Slightly curved or kinked cracks*. s.l. : International Journal of Fracture, 16: pp 155 - 169, 1980.
41. **Dillard, D.A., Singh, H.K., Pohlit, D.J., and Starbuck, J.M.** *Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints*. s.l. : Journal of Adhesion Science and Technology, 23: pp 1515 – 1530, 2009.
42. **Russell, A.J., Street, K.N.** *Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy*. s.l. : ASTM STP; 876: pp 349 - 370, 1985.
43. **Army - MR, Navy - AS, Air Force - 11.** *Composite Materials Handbook - Volume I. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials*. Department of Defense, United States of America : MIL-HDBK-17-1F, 2002.
44. **Crews, J.H., Reeder, J.R.** *A Mixed-Mode Bending Apparatus for Delamination Testing*. s.l. : NASA technical Memorandum 100662, 1988.
45. **Kinloch, A.G., Wang, Y., Williams, J.G., Yayla, P.** *The mixed mode delamination of fiber composite materials*. s.l. : Composites Science and Technology, 47: pp. 225 - 237, 1993.
46. **Quispitupa, A., Berggreen, C., Carlsson, L.A.** *ON THE ANALYSIS OF A MIXED MODE BENDING SANDWICH SPECIMEN FOR DEBOND FRACTURE CHARACTERIZATION*. s.l. : Engineering Fracture Mechanics, 76: pp 594 - 613, 2009.
47. **Bradley, W.L., Cohen, R.N.** *Matrix Deformation and Fracture in Graphite-Reinforced Epoxies*. s.l. : ASTM, STP 876: pp 389 - 410, 1985.
48. **Bennatia, S., Colleluoria, M., Coriglianoa, D., Valvoa, P.S.** *An enhanced beam model of the Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB) test for composite laminates*. s.l. : ETDCM8- 8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials, 2007.
49. **Charalambides, P.G., Lund, J., Evans, A.G., McMeeking, R.M.** *A test specimen for determining the fracture resistance of biomaterial interfaces*. s.l. : Journal of Applied Mechanics, 56: pP. 77 - 82, 1989.
50. **Yoon, S.H., Hong, C.S.** *Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites*. s.l. : Internacional Journal of Fracture, 43: pp R3 - R9, 1990.
51. **Szekrényes, A., Uj, J.** *Modified Single-leg Bending Test for Mixed-Mode I/II interlaminar Fracture in Composites*. Lyon, France : Composites in Construction 2005 - Third International Conference, 2005.

52. **Berry, J.P.** *Determination of Fracture Surface Energies by the Cleavage Technique*. s.l. : Journal of Applied Physics, 34: pp 62 - 68, 1963.
53. **D3433-99, ASTM.** *ASTM D3433-99 "Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints1"*. 1999.
54. **Fernandes, Romania Lopes.** *Caracterização à Fratura de um Material Compósito com Carbono-Epóxico e Cortiça*. s.l. : Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
55. **RICE, J.R.** *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. s.l. : Journal of Applied Mechanics, 35: pp. 379 - 386, 1968.
56. **Stigh U., Alfredsson K.S, Anderson T., Biel A., Carlberger T., Salomonsson K.** *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. s.l. : Int J Fract 165: pp 149 - 162, 210.
57. **Campilho R.D.S.G., Moura D.C., Gonçalves D.J.S., da Silva J.F.M.G., Banea M.D., da Silva L.F.M.** *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. s.l. : Composites: Part B 50: pp 120 – 126, 2013.
58. **Biel, A., Stigh, U. e T., Walander.** *A Critical Study of an Alternative Method to Measure Cohesive Properties of Adhesive Layers*. Sweden : University of Skovde, 2013.
59. **Roux, S. e Hild, F.** *Stress intensity factor measurement from digital image correlation: post-processing and integrated approaches*. s.l. : International Journal of Fracture, Vol. 140, pp 141-157, 2006.
60. **Trummer, V.R., et al.** *Analusis of crack growth behavior in a double cantilever beam adhesive fracture test by different digital image processing techniques*. Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Unioversidade do Porto, 2010.
61. **Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M.** *Parametric study of adhesive joints with composites*. s.l. : International Journal of Adhesion & Adhesives 37, pp 96 - 101, 2012.
62. **Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., Silva R.F.Silva e da Silva L.F.M.** *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. s.l. : Journal of Adhesion Science and Technology 25, pp 2351–2368, 2011.
63. **Lanema.** *Aluminios*. Alcoa Distribution and Industrial Productts. s.l. : Representações Lanema, Lda.
64. **Campilho, R.D.S.G., et al.** *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. s.l. : International Journal of Adhesion & Adhesives 31, pp 363-372, 2001.
65. **ASTM-E8M-04** *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. 2004.
66. **Lee, D.B., Ikeda, T., Miyazaki, N., Choi, N.S.** *Effect of Bond Thickness on the Fracture Toughness of Adhesive Joints*. s.l. : Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the Asme, 126: pp 14 - 18, 2004.
67. **Campilho, R.D.S.G., et al.** *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. s.l. : International Journal of Adhesion & Adhesives 53, pp 15-22, 2014.

68. **Neto, J.A.P.** *Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito*. Porto : Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
69. **Campilho, R.D.S.G., et al.** *Obtaining the Cohesive Laws of a Trapezoidal Mixed-Mode Damage Model Using an Iverse Method*. Porto : Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol 20, nº 1/2, 2008, 2008.
70. **da Silva, L.F.M., et al.** *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. s.l. : Internacional Journal of Adhesion & Adhesives, 29, pp 621-632, 2009.
71. **Troughton, M.J.** *Handbook of plastics joining: a pratical guide - 2nd ed.* United States of America : William Andrew Inc., 2008. ISBN: 978-0-8155-1581-4.
72. **Corporation, Henkel.** *Design Guide for Bonding Plastics, Vol 6*. s.l. : Henkel Corporation - Enginering Adhesives, 2011.
73. **da Silva, L.F.M., et al.** *Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. s.l. : Jornal of Adhesion, 82: pp1091 - 1115 , 2006.
74. **Standardization, ECSS - European Cooperation For Space.** *Space engineering - Adhesive bonding handbook*. Noordwijk, The Netherlands : ECSS Secretariat, 2011. ECSS-E-HB-32-21A.



## Anexo A. Características do desmoldante Loctite® 770-NC

 <b>suter-kunststoffe ag</b> <b>swiss-composite.ch</b> <small>CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 031 763 60 61  www.swiss-composite.ch info@swiss-composite.ch</small>	<b>Product Description Sheet</b> <b>FREKOTE® 770-NC</b> Mold Release Agent Industrial Products, October 2003
---	---

**Description**

Loctite® Frekote® 770-NC is a low odor, fast evaporating version of Frekote 700-NC. Frekote 770-NC offers excellent release for various molding applications and can be used as a direct replacement for Frekote 700-NC. Frekote 770-NC can be used for the release of epoxies, polyester resins, vinyl ester resins, thermoplastics, adhesives, and rotationally molded plastics. Frekote 770-NC is particularly well suited for tougher to release processes such as filament winding and non gel coated polyester and fiberglass molding.

**Features**

Versatile - releases most resins  
No contaminating transfer  
High gloss and high slip  
Room temperature cure  
No mold build-up  
Low odor

**Physical Properties**

Appearance	Clear liquid
Odor	Hydrocarbon
Solvents	Aliphatic Hydrocarbon
Specific Gravity	0.720 +/- .015
Shelf Life	One year from date of manufacture
Special Cautions	Moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use.
Cured thermal stability	400°C (750°F)
Application Temp	3°C - 60°C (55°F -140°F)

**Mold Preparation**

The mold surface must be clean and free of any release agent or other contaminants for Frekote 770-NC to be completely effective. Remove any contaminants with Frekote PMC or another suitable cleaning solvent. Light industrial abrasives can be used to remove heavy resin build up.

**New Molds**

Full curing of new molds is advisable to ensure the best bonding of the Frekote to the mold surface. New fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions before starting full scale production.

**Note** For porous or repaired molds, a Frekote Sealer should be used - technical data is available. Consult with your Frekote Representative for assistance.

**Application** \*Consult MSDS prior to use\*

Frekote 770-NC can be applied to mold surfaces at room temperature up to 60°C (140°F) by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying, ensure a dry air source is used or use an airless spray system. If possible, warm the mold prior to applying Frekote 770-NC to approximately 50°C (120°F) to drive off any moisture entrapped on the mold surface.

1. Only a thin wet film is required. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 8-10 inches (from mold surface). It is suggested that small areas be coated working progressively from one side of the mold to the other.
2. Initially, apply 2 - 3 base coats, allowing 5-10 minutes after each application for complete solvent evaporation.
3. Wait 5-10 minutes after the final coat for curing of the polymer resin prior to molding. The film should be dry and not feel tacky.
3. Aerosols may sometimes leave a matte surface finish. To enhance gloss, use a cotton cloth to gently buff up dry film, if required.
4. Performance is enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to Frekote 770-NC.
5. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring. For temperatures up to 60°C (140°F), use Frekote 770-NC and cure as per instructions above. For mold temperatures above 60°C (140°F), Frekote HMT-2 is recommended.

**Note** Touch-up coats applied at regular intervals before the base film breaks down will extend the number of releases obtainable and reduce possible resin attack/build-up.

**Precaution** Users of closed mold systems (i.e. rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

**Flammability/Storage**

Frekote 770-NC contains flammable solvents. The product should always be used in well ventilated areas. Store in a cool, dry place. Consult MSDS for complete details.

NOT FOR PRODUCT SPECIFICATIONS  
THE TECHNICAL DATA CONTAINED HEREIN ARE INTENDED AS REFERENCE ONLY.  
PLEASE CONTACT LOCTITE CORPORATION, QUALITY DEPARTMENT FOR ASSISTANCE AND RECOMMENDATIONS ON SPECIFICATIONS FOR THIS PRODUCT.  
ROCKY HILL, CT FAX: +1 (860) 871-5473 DUBLIN, IRELAND FAX: +353 (1) 481 9999

Loctite and Frekote are Registered Trademarks of Loctite Corporation U.S.A.

Frekote® 770-NC, October 2003

**Note**

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, Loctite Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Loctite Corporation's products. Loctite Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits. The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Loctite Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more, United States, or foreign patents or patent applications.

**suter-kunststoffe ag**  
**swiss-composite.ch**

CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 031 763 60 61  
www.swiss-composite.ch info@swiss-composite.ch

Loctite and Frekote are Registered Trademarks of Loctite Corporation U.S.A.

## Anexo B. Folha da liga de alumínio 6082-T651

PLACAS STANDARD

**LIGA 6082** AlSi1MgMn





COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% PESO)									
ELEMENTOS	Si	Fe	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn	Ti	Al
MÍN.	0,7			0,1	0,6				
MÁX.	1,3	0,5	0,1	1	1,2	0,25	0,2	0,3	Resto

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- ▶ Boa maquinagem
- ▶ Alta resistência mecânica
- ▶ Alta resistência à corrosão
- ▶ Boa soldadura com adicionamento de metais
- ▶ Muito boa optidão ao polimento
- ▶ Apto para anodizado decorativo

APLICAÇÕES

- ▶ Elementos submetidos a elevadas tensões mecânicas
- ▶ Estruturas de engenharia
- ▶ Construções navais e de veículos
- ▶ Electrodomésticos
- ▶ Indústria eléctrica e peças de precisão
- ▶ Moldes para colado

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS		ESTADO METALÚRGICO		
		RECOCIDO	TEMPER. SOLUC.	AMOLHECIDO
CONDUTIVIDADE	CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA	EXCELENTE	BOM	BOM
	RESISTÊNCIA EM ATMOSFERA INDUSTRIAL	BOM	EXCELENTE	EXCELENTE
CORROSÃO	RESISTÊNCIA EM ATMOSFERAS INDUSTRIAIS E MARÍTIMAS	MÓDIO	BOM	BOM
	ADRIUMINADO	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE	ANODIZADO INDUSTRIAL	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
	ANODIZADO DECORATIVO	MÓDIO	BOM	BOM
TRANSFORMAÇÃO	DOBRAR A QUENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
	DOBRAR A FRIA	EXCELENTE	MÓDIO	MÓDIO-BOM
	EMBUTIDO/REPERADO	EXCELENTE	BOM	NÃO RECOMENDADO
	FORJADO	BOM	NÃO RECOMENDADO	NÃO RECOMENDADO
MONTAGEM	MAQUINAGEM	BOM	BOM	BOM
	SOLDADURA SOB ATMOSFERA PROTECTORA	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
	SOLDADURA POR RESISTÊNCIA	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE



PROGRAMA DE FABRICO | CARACTERÍSTICAS

PLACAS									
ESPESSURA (mm)	DIMENSÕES (mm)	PESO CHAPA (kg)	ESTADO T4	ESTADO T651	ESPESSURA (mm)	DIMENSÕES (mm)	PESO CHAPA (kg)	ESTADO T4	ESTADO T651
2,0	2000 x 1000	11,13	○	●	35,0	3000 x 1500	430,79	○	●
3,0	2000 x 1000	16,69	○	●	40,0	2500 x 1200	345,64	○	●
4,0	2000 x 1000	22,25	○	●	40,0	3000 x 1500	495,76	○	●
5,0	2000 x 1000	27,82	○	●	45,0	2500 x 1200	390,85	○	●
5,0	2000 x 1200	43,23	○	●	45,0	3000 x 1500	552,78	○	●
5,0	3000 x 1500	61,97	○	●	50,0	2500 x 1200	430,85	○	●
6,0	2000 x 1000	33,38	○	●	50,0	3000 x 1500	619,70	○	●
6,0	2500 x 1200	51,85	○	●	55,0	2500 x 1200	475,26	○	●
6,0	3000 x 1500	74,37	○	●	55,0	3000 x 1500	660,67	○	●
8,0	2000 x 1000	44,51	○	●	60,0	2500 x 1200	518,67	○	●
8,0	2500 x 1200	68,13	○	●	60,0	3000 x 1500	740,65	○	●
8,0	3000 x 1500	99,15	○	●	65,0	2500 x 1200	561,67	○	●
10,0	2500 x 1200	86,41	○	●	65,0	3000 x 1500	805,62	○	●
10,0	3000 x 1500	123,94	○	●	70,0	2500 x 1200	604,88	○	●
12,0	2500 x 1200	103,69	○	●	70,0	3000 x 1500	867,59	○	●
12,0	3000 x 1500	168,23	○	●	75,0	2500 x 1200	640,08	○	●
15,0	3000 x 1500	199,42	○	●	75,0	3000 x 1500	999,64	○	●
15,0	3000 x 1500	185,91	○	●	80,0	2500 x 1200	670,29	○	●
20,0	2500 x 1200	172,82	○	●	80,0	3000 x 1500	991,53	○	●
20,0	3000 x 1500	247,80	○	●	90,0	2500 x 1200	777,70	○	●
25,0	2500 x 1200	216,03	○	●	90,0	3000 x 1500	1115,47	○	●
25,0	3000 x 1500	309,85	○	●	100,0	2500 x 1200	844,71	○	●
30,0	2500 x 1200	259,22	○	●	100,0	3000 x 1500	1209,61	○	●
30,0	3000 x 1500	373,82	○	●	120,0	2500 x 1200	1034,93	○	●
35,0	2500 x 1200	302,44	○	●	120,0	3000 x 1500	1461,29	○	●

● material normalmente em stock ○ material com prazo de entrega curto ○ material de baixa produção/ entrega sob consulta

PROPRIEDADES FÍSICAS	RECOZIDO	TEMPER. AMADURECIDO	TEMPER. REVENIDO
DENSIDADE	2,70 g/cm <sup>3</sup>	2,70 g/cm <sup>3</sup>	2,70 g/cm <sup>3</sup>
MÓDULO ELÁSTICO	69000 MPa	69000 MPa	69000 MPa
CORFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA (20°C - 100°C)	23,4 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	23,4 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	23,4 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	105-120 W/mK	145-165 W/mK	150-170 W/mK
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (20°C)	34-38 MS/m	45-40 MS/m	43-38 MS/m

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS									
ESTADO METALÚRGICO	ESPESSURA (mm)		Re (MPa)		Rp0,2 (MPa)	Fut. Plug. R. Mm. Int.		HB (DUREZA)	ALARGAMENTO %
EN	de 0,4	até	até	máx.	máx.	100°C	100°C	BRINELL	AVO
0	0,4	1,5	-	150	<85	1	0,5	35	14
	1,5	3	-	150	<85	1	1	35	16
	3	6	-	150	<85	-	1	35	18
	6	12,5	-	150	<85	-	2	35	17
T4	0,4	1,5	205	-	>110	3	1,5	65	10
	1,5	3	205	-	>110	3	2	65	14
	3	6	205	-	>110	-	3	65	16
	6	12,5	205	-	>110	-	4	65	16
T6	0,4	1,5	310	-	>240	-	2,5	95	6
	1,5	3	310	-	>240	-	3,5	95	7
	3	6	310	-	>240	-	6,5	95	10
	6	12,5	300	-	>240	-	6	100	9
T651	12,5	40	295	-	>240	-	-	100	8
	40	80	295	-	>240	-	-	100	7
	80	100	290	-	>240	-	-	100	6
	100	150	275	-	>240	-	-	100	6
	150	175	275	-	>230	-	-	100	6

Serviço de corte à medida | Se não encontrar a espessura ou a dimensão desejada consulte-nos



EQUIVALÊNCIAS INTERNACIONAIS

LANEMA	E.U. NORMAS E.N.	ESPAÑA NORMAS UNE	FRANÇA AFNOR	ALEMANHA D.I.N. (1913-1925)	G.B. B.S.	SUECIA S.I.S.	SURICA	CANADA C.S.A.	ITALIA I.S.I.	CEL. DIN	AUSTRIA ONORM
<b>Alumínio Virgem</b>											
1050	AW 1050	L-3051 38.314	A-5	Al 99.5 3.0255	1-B	4007	Al 99.5	995 (25)	4327 9001/2	A-5	Al 99.5
1350	AW 1350	L-3053 38.316	A-5L	Al 3.0257	1-E	4008	Al 99	-	-	A-6	-
1070	AW 1070	L-3027 38.317	A-7	Al 99.2 3.0275	2-L-48	4005	Al 99.2	9170	4528 9001/3	A-7	Al 99.2
1080 A	AW 1080 A	L-3081 38.318	A-8	Al 99.6 3.0285	1-A	4004	Al 99.8	9180	4509 9001/4	A-8	Al 99.6
1200	AW 1200	L-3001 38.315	A-4	Al 99 3.0205	1-C	4010	Al 99	990 (25)	3547 9001/1	A-0	Al 99
<b>Alumínio com Manganês</b>											
3003	AW 3003	L-3006 38.302	A-M1	AlMnCa 3.0537	N-3	-	-	MC 10	7788 9003/1	-	-
3004	AW 3004	L-3006 38.302	A-M2	AlMn1Mg 3.0526	-	GA 6311	-	(0-25)	4351 9003/2	-	-
3005	AW 3005	L-3010 38.301	A-M2.5	AlMn1Mg0.5 3.0525	-	-	-	-	-	-	-
3103	AW 3103	L-3010 38.301	A-M	AlMn1 3.0515	N-3	4007	AlMn	-	3548 9003/2	SuMn	-
3105	AW 3105	-	-	AlMn0.5Mg0.5 3.0505	N-31	-	-	-	-	-	-
<b>Alumínio com Magnésio</b>											
5005	AW 5005	L-3350 38.335	A-50.5	AlMg1 3.3315	N-41	4104	AlMg1	(0-37.5)	5744 9005/1	1518	-
5050	AW 5050	L-3380 38.338	A-61	AlMg1.5 3.3316	3-L-44	-	(AlMg1.5)	(A-57.5)	3573 9005/7	-	-
5052	AW 5052	L-3340 38.336	A-62.5C	AlMg2.5 3.3523	1-80/181	4120	AlMg2.5	68.20 (57.5)	3574 9005/2	1520	AlMg2.5
5056 A	AW 5056 A	L-3320 38.332	A-65M	AlMg5 3.3555	N-6/2158	4146	AlMg5	68.50 R (54.5)	3576 -	1530	AlMg5
5083	AW 5083	L-3321 38.340	A-64.5M	AlMg1.5Mn 3.3547	N-8	4140	AlMg1.5Mn	68.41 (0-54.5)	7790 9005/5	1540	AlMg1.5Mn
5086	AW 5086	L-3322 38.341	A-64MC	AlMg4Mn2 3.3545	-	-	AlMg4Mn	6.40	5452 9005/4	-	-
5154 A	AW 5154 A	L-3394 38.331	(A-62.5M)	AlMg3.5MnCr -	N-5	4123	-	68.40 (C-54.5)	3575 9005/8	1530 (51.0 A)	-
5251	AW 5251	L-3341 38.347	A-62W	AlMg3Mn0.3 3.3525	N-4	-	-	(M-57.5)	3574 9005/2	-	AlMg2Mn0.3
5454	AW 5454	L-3391 38.345	A-62.5MC	AlMg2.7Mn 3.3537	N-51	-	AlMg2.7Mn	-	7789 9005/3	-	-
57 54	AW 57 54	L-3390 38.339	A-63M	AlMg3 3.3535	(N-51)	4130	AlMg3	-	- (9005/2)	-	-



# Anexo C. Folha de dados do adesivo SikaForce® 7888

Industry

Hoja de Datos de Producto  
Versión 3 (07/2010)

## SikaForce®-7888 L10

Adhesivo altamente estructural de rápido curado para ensamblaje

**Datos Técnicos:**

Propiedades	Componente A (Resina) 7888 L10 A	Componente B (Endurecedor) 7888 B
Base química	Poliéster, con cargas	Derivados de isocianato, sin cargas
Mecanismo de reacción	Polidición	
Contenido en sólidos	100 %	100 %
Color	Negro	Amarillento
Color de la mezcla	Negro	
Densidad (25 °C) (CQP 553-1)	1,66 g/cm³ aprox.	1,18 g/cm³ aprox.
Viscosidad (25 °C) (CQP 536-1)	18.000 mPas aprox.	18.000 mPas aprox.
Viscosidad de la mezcla (CQP 536-1)	65.000 mPas	
Relación de mezcla	100	70
en peso en volumen	100	100
Tixotropía	Buena	
Vida de la mezcla 25 °C <sup>1)</sup> (CQP 536-1)	10 min. aprox.	
Desarrollo de la resistencia y velocidad de curado	Aún no determinado	
Rango de temperatura de aplicación	15-35 °C	
Dureza Shore-D (DIN 53505/CQP 537-1) <sup>2)</sup>	70 aprox.	
Resistencia a tracción (ISO 527/CQP 545-1) <sup>3,4)</sup>	20 Mpa aprox.	
Alargamiento a rotura (ISO 527/CQP 545-1) <sup>3,4)</sup>	40% aprox.	
Resistencia a cortadura (DIN EN 1465 /CQP 546-1) <sup>3,4)</sup>	20 Mpa aprox. (depende del sustrato)	
Temperatura de transición vítrea (CQP 509-1)	40 °C aprox.	
Vida del producto (en envase original cerrado por debajo de 25 °C) <sup>5)</sup>	6 meses	

<sup>1)</sup> Tiempo para incremento de viscosidad a 150.000 mPas en reómetro

<sup>2)</sup> Temperatura de ensayo: 23 °C, 50% humedad relativa; condiciones de curado: 48 hrs. RT + 3 hrs. 105 °C + 24 hrs. RT

<sup>3)</sup> Sustrato: AlCuAg; platinada; espesor de capa: 1 mm

<sup>4)</sup> Espesor de capa en el ensayo: 4 mm

**Descripción**

SikaForce®-7888 L10 es un adhesivo base poliuretano bicomponente altamente estructural de montaje que cura por reacción química para convertirse en un polímero duradero. Los dos componentes se aplican mediante cartucho por medio de una pistola neumática y un mezclador estático, también mediante el adecuado equipo de mezclado y medida.

**Ventajas**

- Corta rotura de hilo.
- Buena tixotropía.
- Adecuado tiempo de trabajo a pesar de su rápido curado.
- Rápido desarrollo de la resistencia, curado a temperatura ambiente.

- Muy alta resistencia.
- Elevada elongación (buena resistencia al impacto).
- Resistencia a los esfuerzos dinámicos.
- Buena adhesión sobre una amplia variedad de sustratos.
- No conductor.
- Resistente al envejecimiento.
- Libre de solventes y PVC

SikaForce®-7888 L10 1/3

**Áreas de aplicación**

SikaForce®-7888 L10 es adecuado para uniones estructurales que vayan a estar expuestas a esfuerzos dinámicos y donde la necesidad de un rápido desarrollo de la resistencia y curado sea un requisito esencial. SikaForce®-7888 L10 es ideal para el pegado y ensamblado de piezas de elevado tamaño.

Apto para materiales como plásticos y metales, particularmente aluminio (incluido anodizado), acero (incluido fosfatado, cromado, y zincado), imprimaciones de metales y pinturas (sistema 2C), SMC y otros materiales GFR, madera y materiales cerámicos. Téngase en cuenta las indicaciones del fabricante antes de usar sobre plásticos transparentes, que son susceptibles de sufrir rotura por tensión.

**Mecanismo de curado**

El curado del SikaForce®-7888 L10 tiene lugar por la reacción química entre los dos componentes.

El proceso de curado se acelera a medida que aumenta la temperatura y a la inversa, es decir, al disminuir la temperatura se prolonga el proceso de curado.

**Resistencia química**

SikaForce®-7888 L10 es resistente a la hidrólisis (excelente resistencia). Como la resistencia ante los agentes químicos depende enormemente del sustrato, de la concentración del agente químico, duración de la exposición y la temperatura es muy recomendable realizar ensayos previos. Esto mismo es válido para la resistencia a la temperatura.

Si el adhesivo no está expuesto a sustancias químicas el adhesivo resiste permanentemente temperaturas por encima de los 100 °C, resistiendo picos de temperatura por encima de este valor durante breves espacios de tiempo.

En caso de que la junta vaya a estar expuesta a agentes químicos recomendamos realizar ensayos previos.

**Método de aplicación****Preparación superficial**

El área de pegado debe estar limpia, seca y libre de grasa, aceite y polvo. Si necesita asesoramiento sobre aplicaciones específicas póngase en contacto con el Departamento Técnico de Sika Industria.

**Aplicación**

Cartuchos de 2-C:

Pistola tanto manual como neumática.

Usar mezclador estático Sulzer Quadro 8,7z. Antes de la aplicación sobre el material es absolutamente necesario aplicar al menos un cordón de 30 cm. Para alcanzar la mejor calidad de la mezcla.

Hobcock: SikaForce®-7888 L10 puede ser aplicado directamente desde hobcocks mediante la utilización de un equipo de bombeo tanto neumático como hidráulico utilizando mezcladores tanto estáticos como dinámicos.

No aplicar a temperaturas inferiores a 15 °C ni superiores a 30 °C. La temperatura óptima de aplicación se sitúa entre los 15 y 30 °C.

Si necesita asesoramiento acerca del adecuado sistema de bombeo por favor póngase en contacto con el Departamento de Ingeniería de Sika Industria.

**Limpieza**

SikaForce®-7888 L10 no curado puede ser eliminado de las herramientas e instrumentos con Sika® Remove-208, isopropanol, acetona, etc. Una vez curado, los restos sólo pueden eliminarse mecánicamente.

Las manos y piel expuesta al producto se deben limpiar con toallita Sika Hand® Cleaner o un limpiador industrial y agua. No utilizar solventes.

**Condiciones de almacenamiento**

La resina y el endurecedor son sensibles a la humedad. Por lo tanto tienen que ser almacenados en los envases bien cerrados. Después de su uso cerrar inmediatamente.

La resina debe ser almacenada entre 5 y 30 °C. Debe ser agitada antes de su uso.

El endurecedor debe almacenarse entre 15 y 30 °C.

Durante la aplicación ambos componentes pueden estar expuestos a temperaturas por debajo de 0 °C como máximo durante 3 días. No usar si está cristalizado o los componentes no se han mezclado homogéneamente.

**Más información**

Existe a su disposición:

– Hojas de Seguridad e higiene

**Tipos de envase**

Componente A (Resina)	Hobcock 25 kg
Componente B (Endurecedor)	Hobcock 20 kg
Cartucho 2C + mezclador estático Sulzer 8,7 z	600 ml (componente A+B)

**Bases**

Todos los datos técnicos dados en esta hoja técnica se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar por circunstancias fuera de nuestro control.

**Información sobre salud y seguridad**

Para información y consejo sobre la manipulación, almacenaje y manejo de productos químicos usados debe remitirse a la actual Hoja de Seguridad del producto la cual contiene datos de seguridad físicos, ecológicos y toxicológicos.



# Industry

## Notas legales

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones

reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo con el uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho

de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Producto local, copia de las cuales se mandarán a quien las solicite, o también se puede conseguir en la página "www.sika.es".



Sika, S.A.U.  
C/ Aragoneses, 17  
28106 Alcobendas (Madrid)  
Tel. 91 857 22 75  
Fax 91 861 89 80



SikaForte® 1888 L10 - 8/0





## Anexo D. Folha de dados do adesivo Araldite® 2015



### Advanced Materials

## Araldite® 2015

Structural Adhesives

### TECHNICAL DATA SHEET

## Araldite® 2015

### Two component epoxy paste adhesive

#### Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non sagging up to 10mm thickness
- High shear and peel strength

#### Description

Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

#### Product data

Property	2015 A	2015 B	Mixed Adhesive
Colour (visual)	neutral paste	neutral paste	neutral paste
Specific gravity	1.4	1.4	1.4
Viscosity at 25°C (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	30 - 40 minutes

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 2015/A	100	100
Araldite 2015/B	100	100

Araldite 2015 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

#### Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of an suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit [www.araldite2000plus.com](http://www.araldite2000plus.com).

#### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

#### Times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1MPa	minutes	-	-	-	-	17	6
Cure time to reach	hours	21	13	6	2	-	-
LSS > 10MPa	minutes	-	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

#### Typical cured properties

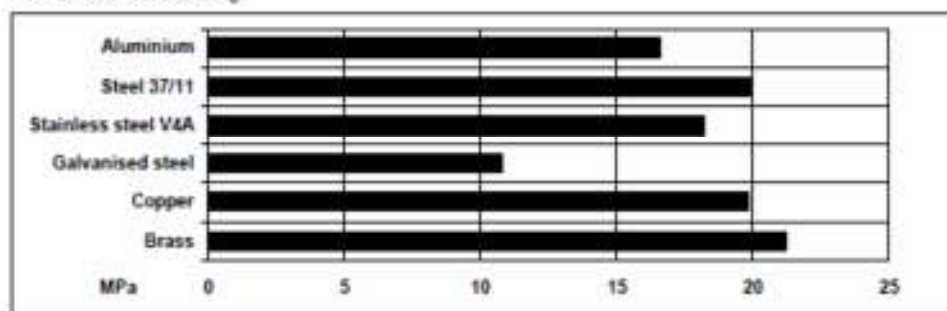
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

#### Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C

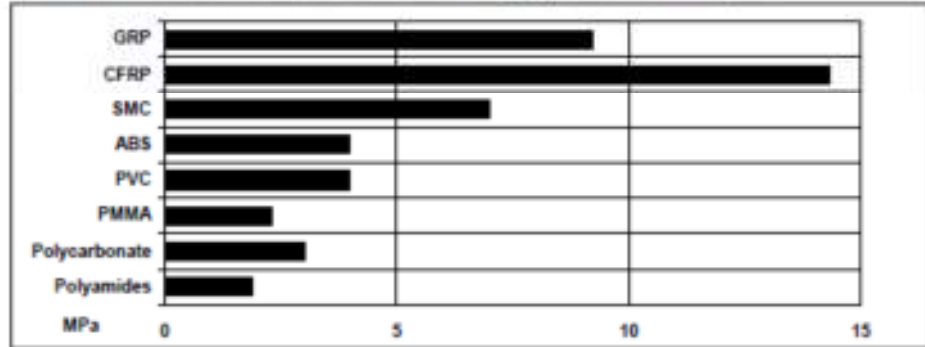
Pretreatment - Sand blasting





**Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease.



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

30 MPa

Tensile modulus

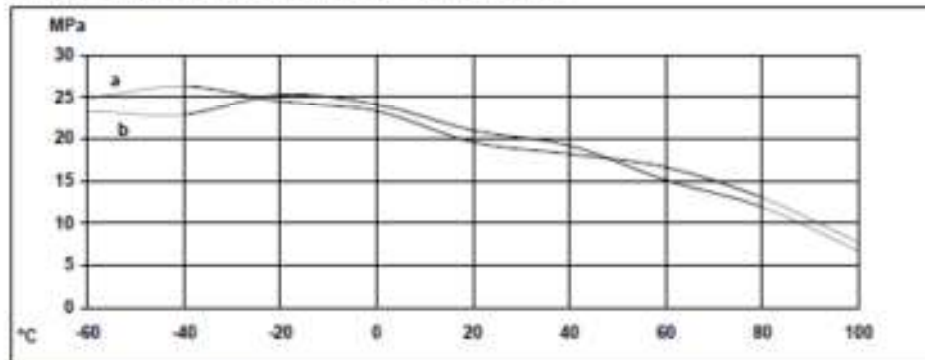
2 GPa

Elongation at break

4.4 %

**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C



Roller peel test (ISO 4578)

4 N/mm

Cured: 16 hours at 40°C

Glass transition temperature

67°C by DSC

Cure: 16 hours at 40°C

87 by shear modulus

Cure: 1 hour at 80°C

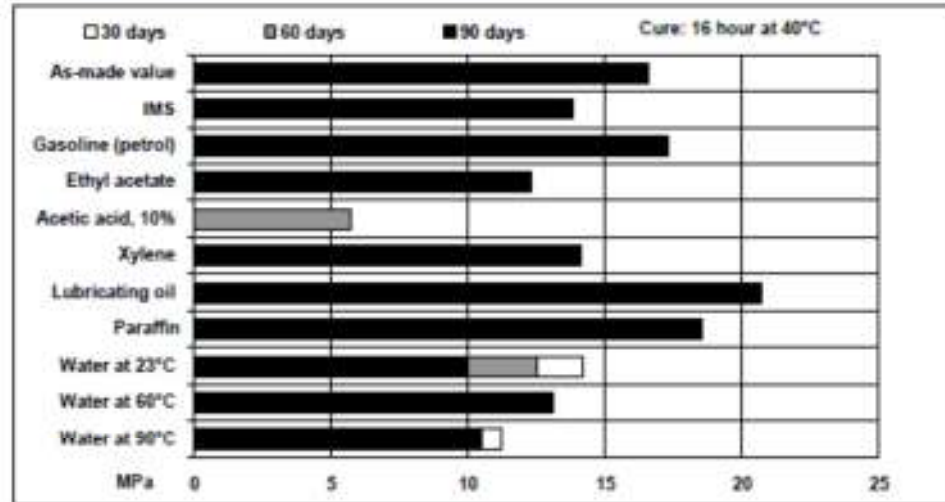
DIN 53445

Dielectric constant (500V at 25°C)

5.6 at 1 kHz

**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

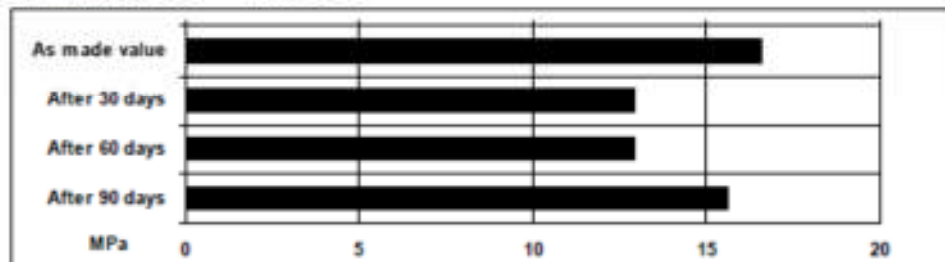
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



**Lap shear strength versus tropical weathering**

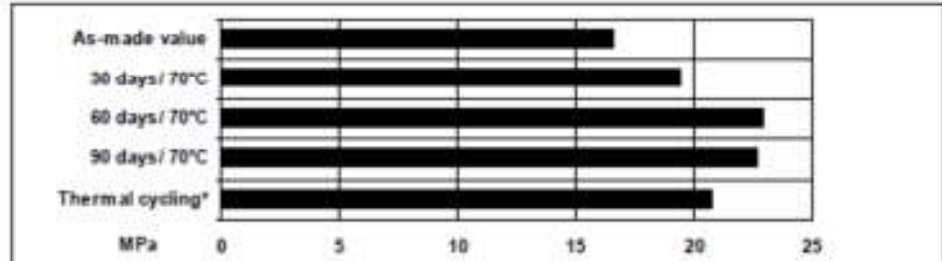
(40/92, DIN 50015; typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C Test: at 23°C



**Lap shear strength versus heat ageing**

Cure: 16 hours at 40°C



\*25 cycles -30°C to + 70°C

**Shear modulus (DIN 53445)**

Cure: 1 hour at 80°C

Temperature	G'	λ
0°C	1.0 Gpa	0.25
25°C	0.9 Gpa	0.25
50°C	0.8 Gpa	0.35
75°C	0.2 Gpa	1.9
100°C	2 MPa	0.5

**Flexural Properties (ISO 178) Cure: 16 hours/ 40°C**

tested at 23°C

Flexural Strength

42.7 MPa

Flexural Modulus

1813.6 MPa

**Resistance to fatigue (40 Hz at 23°C) (quoted as cycles to failure)**

Maximum applied load	Sandblasted aluminium	Chromate pickled aluminium
20% of static failing load	>10 <sup>7</sup>	>10 <sup>7</sup>
25% of static failing load	>10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
30% of static failing load	3 x 10 <sup>6</sup>	6 x 10 <sup>6</sup>

(Static failing load 18 MPa)

<b>Storage</b>	Araldite 2015/A and Araldite 2015/B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.
<b>Handling precautions</b>	<p><b>Caution</b></p> <p>Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.</p>
<b>Huntsman Advanced Materials</b>	<p>All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.</p>



**Huntsman Advanced Materials**  
 (Switzerland) GmbH  
 Klybeckstrasse 200  
 4057 Basel  
 Switzerland

Tel: +41 (0)61 966 33 33  
 Fax: +41 (0)61 966 35 19  
[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) B.V./A, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) B.V./A in Europe.

[Araldite® 2015] is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

## Anexo E. Folha de dados do adesivo Araldite® AV138

### Advanced Materials

## Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

### Structural Adhesives

## Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

### Two component epoxy adhesive

#### Key properties

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Thixotropic, gap filling paste

#### Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

#### Typical product data

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998	Mix
Colour (visual)	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.7	ca. 1.7
Viscosity (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	35 mins

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

##### Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even con-



tact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

#### Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

#### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

#### Curing times

Temperature	°C	10	15	23	40	60	80	100
Cure time	hours	48	36	24	16	1	-	-
	minutes	-	-	-	-	-	15	10
LSS at 23°C	N/mm <sup>2</sup>	10	11	13	14	15	16	16

LSS = Lap shear strength.

#### Typical cured properties

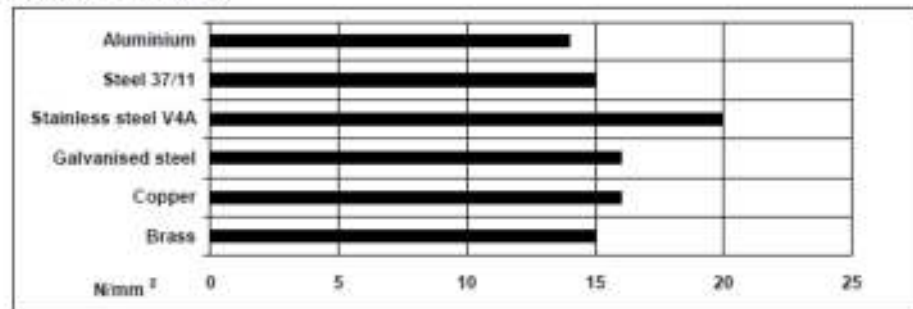
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

#### Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



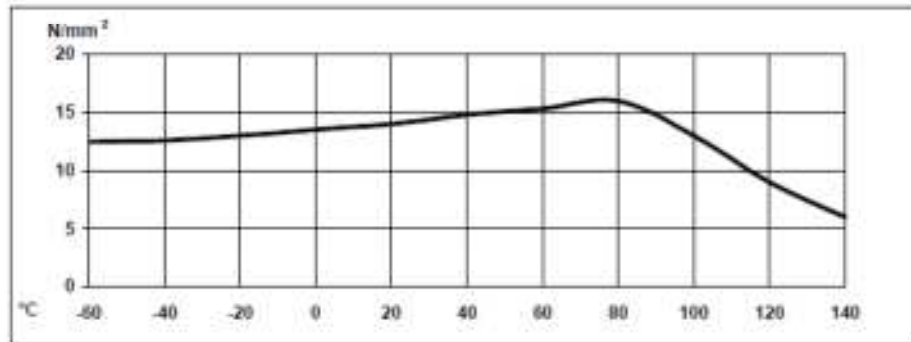
#### Shear modulus (DMA ISO 6721)

Cure: 16 hours at 40°C

-25°C	2175 MPa
0°C	2030 MPa
20°C	1890 MPa
60°C	780 MPa
100°C	34 Mpa
120°C	27 MPa

**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

Cure: 16 hours at 40°C


**Roller peel test (ISO 4578)**

Cure: 16 hours at 40°C

1.8 N/mm

**Shore hardness**

D84-86

**Tensile strength**

Cure: 16 hours at 40°C

43 MPa

**Tensile modulus**

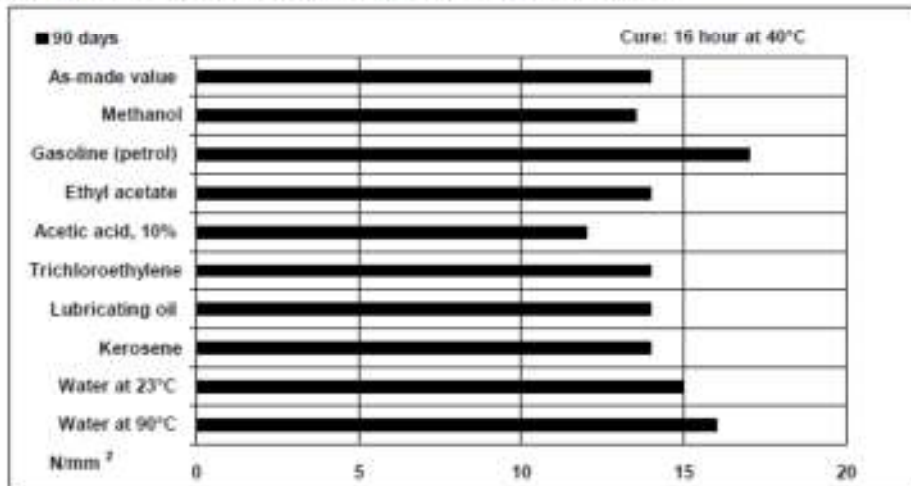
4.7 GPa

**Elongation at break**

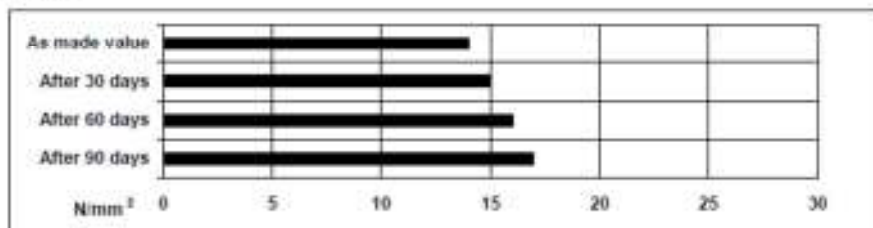
1.2%

**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering  
 (40/92, DIN 50015; typical average values)  
 Test at 23°C



### Storage

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

### Handling Precautions

#### Caution

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary, likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials  
 (Switzerland) GmbH  
 Kybeckstrasse 200  
 4057 Basel  
 Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11  
 Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.huntsman.com/advanced\_materials  
 Email: advanced\_materials@huntsman.com

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE. IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd. Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.